

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUIS EDUARDO MARTINS DE LIMA

**UMA ARQUITETURA DE CONTROLE PARA UM ROBÔ QUADRÚPEDE  
COM COMPORTAMENTO REFLEXIVO DE ESTABILIDADE**

VITÓRIA 2007

**LUIS EDUARDO MARTINS DE LIMA**

**UMA ARQUITETURA DE CONTROLE PARA UM ROBÔ QUADRÚPEDE  
COM COMPORTAMENTO REFLEXIVO DE ESTABILIDADE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Faria Santos Amaral

VITÓRIA 2007

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

L732a Lima, Luis Eduardo Martins de, 1969-  
Uma arquitetura de controle para um robô quadrúpede com  
comportamento reflexivo de estabilidade / Luis Eduardo Martins de  
Lima. – 2007.  
142 f. : il.

Orientador: Paulo Faria Santos Amaral.  
Tese (doutorado) – Universidade Federal do Espírito Santo,  
Centro Tecnológico.

1. Robótica. 2. Controle automático. 3. Lógica difusa. 4.  
Processamento de dados. 5. Sistemas de transmissão de dados. 6.  
Sensoriamento remoto. I. Amaral, Paulo Faria Santos. II.  
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III.  
Título.

CDU: 621.3

---

**LUIS EDUARDO MARTINS DE LIMA**

**UMA ARQUITETURA DE CONTROLE PARA UM ROBÔ QUADRÚPEDE  
COM COMPORTAMENTO REFLEXIVO DE ESTABILIDADE**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica na área de concentração Automação.

Aprovada em 07 de dezembro de 2007.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Paulo Faria Santos Amaral - Orientador**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

---

**Prof. Dr. Lucas Antonio Moscato**  
**Universidade de São Paulo**

---

**Prof. Dr.rer.nat. Hans Jorg Andreas Schneebeli**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

---

**Prof. Dr. Mário Sarcinelli Filho**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

---

**Prof. Dr. Teodiano Freire Bastos Filho**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

Dedico esta tese aos meus Pais, **Professor José de Lima** e **Professora Ilma Martins de Lima**, que me ampararam em meus primeiros passos na vida e até hoje continuam me ensinando a viver. Ao meu PAI muito obrigado, e muitas saudades...

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a DEUS por minha VIDA, por minha SAÚDE, por minha FAMÍLIA.

À minha esposa Soraya, companheira de todas as horas.

Às minhas filhas Isabela e Gabriela, razões principais de todo meu empenho em vencer.

Aos meus pais, dos quais herdei bens indispensáveis à construção de uma vida digna e correta, fatores de apoio essenciais ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Paulo Amaral, pelos seus ensinamentos, pelo seu incentivo e exemplos de prática profissional que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Antônio Bento Filho, por sua amizade, pelo seu auxílio no trabalho de equipe e pelo seu exemplo de perseverança em busca de um objetivo.

À Automática Tecnologia S.A., por todo o apoio recebido na execução deste projeto de pesquisa, tanto quanto a infra-estrutura de trabalho, como quanto aos recursos materiais disponibilizados. Agradeço pela participação de todos os profissionais da Automática, que direta ou indiretamente colaboraram para a execução deste projeto, em especial Prof. Dr. Benedito Geraldo Miglio Pinto e o Eng. M.Sc. Rafael Lacerda Alves.

Agradeço ao CEFET-ES, por toda a contribuição que esta instituição concedeu para viabilizar minha participação no PPGEE-UFES.

Também agradeço ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFES e ao Programa de Pós-Graduação deste Departamento, pela oportunidade que tive de enriquecer minha formação acadêmica com a participação neste projeto de pesquisa.

## RESUMO

Esta tese apresenta uma arquitetura de controle para um robô quadrúpede com 16 graus de liberdade (4 por perna), o Guará\*. A proposta de desenvolvimento desta arquitetura visa estabelecer uma plataforma de estudo de problemas inerentes a robôs móveis quadrúpedes, tais como a geração de andaduras, o controle de movimentos complexos, a transposição de obstáculos e a implementação de reflexos de estabilidade. O desafio aqui enfrentado é dotar o robô de autonomia suficiente para processar, a bordo do mesmo, o controle da locomoção e estratégias de transposição de obstáculos, através do uso de uma arquitetura que permita uma interação eficaz do robô com o ambiente em que ele navega, com custo computacional reduzido.

A arquitetura de controle proposta inclui o uso de comportamento reflexivo de estabilidade. A estrutura hierárquica desta arquitetura concentra o processamento da modelagem cinemática do robô e a tomada de decisão para definição dos movimentos a serem realizados (em uma locomoção livre ou com a presença de obstáculos) no nível mais alto de controle que é o supervisor, sendo utilizada uma rede de comunicação CAN (*Controller Area Network*) para a distribuição das informações a serem processadas nos níveis inferiores de controle (níveis coordenador e atuador).

Para permitir a interação reativa do robô com o ambiente de navegação, objetivando a estabilidade de equilíbrio, o controle do Guará faz uso de um acelerômetro de dois eixos que fornece informações para controladores nebulosos processados do nível coordenador de controle. Esta configuração define reações contra inclinações indesejáveis da plataforma do Guará (mergulho e rolagem) geradas no decorrer da locomoção.

O uso do controle hierárquico contribui para a robustez da arquitetura de controle, estabelecendo no nível mais alto de controle (nível supervisor) a flexibilidade para assumir tarefas distintas e complexas (modelagem cinemática e dinâmica, mapeamento do ambiente, dentre outras), enquanto nos níveis inferiores da hierarquia de controle concentram-se as tarefas que exigem respostas imediatas a estímulos externos ou estabilização de equilíbrio do robô.

\* O nome Guará é inspirado na espécie quadrúpede canídea denominada popularmente “Lobo Guará”.

## ABSTRACT

This thesis presents a control architecture for a quadruped Robot with 16 degrees of freedom (4 per leg), the Guar<sup>á</sup>\*. The proposal to develop this architecture aims to set a problem study platform inherent to mobile four-legged robots, such as the walking generation, the complex movement control, the obstacle transposition, and the stability reflex implementation. The challenge faced herein is to endow the robot with sufficient autonomy in order to process on board, the locomotion control and the obstacle transposition strategies, through the use of an architecture which can let an effective interaction of the robot with the environment in which he is navigating, with reduced computational cost.

The proposed architecture is based on the hierarchical control paradigm using reflexive behavior. The hierarchical structure of this architecture concentrates the cinematic modeling processing of the robot and the decision making to define the movements to be fulfilled (in a free locomotion or with the presence of obstacles), in the higher control level that is supervisor level, whereas a net communication CAN (*Controller Area Network*) is used to distribute the information to be processed in the lower level of control (coordinator and actuator level).

To allow the reactive interaction of the robot with the navigation environment, focusing the balance stability, Guar<sup>á</sup>'s control architecture uses a two-axis accelerometer which provides information for fuzzy controllers processed in the coordinator level. This configuration defines reactions against undesirable bending of Guar<sup>á</sup>'s platform (dive and rolling) generated in the course of the locomotion.

The usage of the hierarchic control contributes to the robustness of the control architecture, establishing the higher control level (supervisor level), and the flexibility to take over distinct and complex tasks (cinematic and dynamic modeling, environment mapping, among others), while lower levels of the control hierarch concentrate on the tasks which demand immediate responses to external stimulus or balance stabilization of the robot.

\* The name Guar<sup>á</sup> is inspired on kinds of wolves, popularly called "Lobo Guar<sup>á</sup>".



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 O SISTEMA DE LOCOMOÇÃO .....	2
1.3 O PARADIGMA DE CONTROLE.....	4
1.4 DESCRIÇÃO DA ARQUITETURA DE CONTROLE PROPOSTA .....	7
1.5 O PROBLEMA INVESTIGADO.....	11
1.6 CONTRIBUIÇÕES DESTA PESQUISA.....	15
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
<b>2 COMPORTAMENTOS REFLEXIVOS PARA O CONTROLE DE ROBÔS QUADRÚPEDES .....</b>	<b>18</b>
2.1 CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DE UMA ARQUITETURA DE CONTROLE.....	19
2.2 ARQUITETURAS PARA CONTROLE DE ROBÔS QUADRÚPEDES .....	19
2.2.1 Robô “Patrush II” (Japão) .....	20
2.2.2 Robôs “Titans” – Instituto de Tecnologia de Tokyo (Japão).....	22
2.2.3 Robô “BISAM” ( <u>B</u> Biologically <u>I</u> nspired <u>W</u> alking <u>M</u> achine) (Inglaterra) .....	24
2.3 COMPARAÇÃO DAS ARQUITETURAS DE CONTROLE .....	27
2.4 A CONTRIBUIÇÃO DA ARQUITETURA DE CONTROLE DO GUARÁ.....	28
<b>3 A ARQUITETURA DE CONTROLE PROPOSTA.....</b>	<b>31</b>
3.1 OBJETIVOS.....	31
3.2 ARQUITETURA DE CONTROLE.....	32
3.2.1 Nível Supervisor de Controle.....	33
3.2.2 Nível Coordenador de Controle .....	34
3.2.3 Nível Atuador de Controle .....	34
3.3 <i>SOFTWARE</i> DA ARQUITETURA DE CONTROLE.....	35
3.3.1 O <i>software</i> de supervisão .....	35
3.3.2 O <i>software</i> do nível coordenador .....	40
3.3.3 O <i>software</i> do nível atuador.....	43
3.4 O USO DA REDE CAN .....	45

3.4.1	Agenda de mensagens (Algoritmos de Escalonamento) .....	48
3.4.2	Escolha do <i>scheduling</i> para o controle do GUARÁ .....	48
<b>4</b>	<b>COMPORTAMENTO REFLEXIVO DE ESTABILIDADE .....</b>	<b>51</b>
4.1	COMPORTAMENTOS REFLEXIVOS PARA ROBÔS QUADRÚPEDES .....	51
4.1.1	Movimentos para reação ao desequilíbrio de robôs quadrúpedes .....	52
4.1.2	Estratégias para controle de equilíbrio de robôs quadrúpedes .....	53
4.2	A ESTRATÉGIA PROPOSTA PARA CONTROLE DA ESTABILIDADE .....	55
4.2.1	A supervisão no controle da estabilidade .....	57
4.2.2	A coordenação no controle da estabilidade .....	57
4.2.3	Os atuadores no controle da estabilidade .....	58
4.2.4	O uso das chaves de contato nas patas .....	59
4.2.5	O uso do acelerômetro .....	60
4.3	REFLEXOS DO GUARÁ COM USO DE CONTROLADORES NEBULOSOS .....	63
4.3.1	Análise da relação entre graus de liberdade e margem de estabilidade .....	65
4.3.2	Projeto dos controladores nebulosos .....	69
4.4	ANÁLISE DA SOLUÇÃO PROPOSTA .....	77
<b>5</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>80</b>
5.1	DEFINIÇÃO DOS IDENTIFICADORES DAS MENSAGENS CAN .....	83
5.2	O FLUXO DE MENSAGENS .....	85
5.3	TESTES EXPERIMENTAIS .....	93
5.4	RESPOSTAS DO ACELERÔMETRO AOS MOVIMENTOS DO GUARÁ .....	95
5.4.1	Resposta do acelerômetro às oscilações naturais da andadura .....	97
5.5	A INFLUÊNCIA DOS REFLEXOS SOBRE A MARGEM DE ESTABILIDADE .....	99
5.6	REFLEXOS OBTIDOS COM USO DO ACELERÔMETRO .....	104
5.6.1	Testes dos reflexos para balanço em mergulho e rolagem .....	104
5.6.2	Reflexos para inclinação longitudinal (mergulho positivo e negativo) .....	107
5.6.3	Reflexos para inclinação transversal (rolagem positiva e negativa) .....	110
5.6.4	Reflexo para mergulho forçado por referências .....	112
5.6.5	Resposta à instabilidade de equilíbrio durante execução da andadura .....	114

<b>6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>117</b>
6.1 A ESTRATÉGIA DE REAÇÃO PARA ESTABILIZAÇÃO DO EQUILÍBRIO .....	117
6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....	119
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>120</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>124</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Sistemas de locomoção: (a) Robô a rodas Pioneer-AT (Pathirana, 2005); (b) Robô a esteira ROBHAZ (Kang, 2005); (c) Robô a pernas AIBO-SONY (Decuir, 2004). .....	3
Figura 1.2 - Arquitetura de Controle Hierárquico para Robôs Móveis (Albus et al, 1988). .....	5
Figura 1.3 - Arquitetura Subsumção (Brooks, 1986).....	6
Figura 1.4 - Arquitetura de controle híbrido (Huang et al., 2006).....	7
Figura 1.5 - Diagrama de classificação da arquitetura proposta para o Guará. ....	8
Figura 1.6 - Representação em blocos da arquitetura de controle do Guará. ....	10
Figura 1.7 - Estrutura mecânica do Guará. ....	11
Figura 1.8 – Esquema de geração de reflexos para equilíbrio do Guará. ....	13
Figura 1.9 – Vista geral do Guará. ....	15
Figura 2.1 - Robô Patrush (Kimura, 2000). ....	20
Figura 2.2 - Diagrama da estratégia de controle do Patrush II (Kimura, 2000).....	21
Figura 2.3 - Robô Patrush transpondo obstáculos (Kimura, 2000).....	21
Figura 2.4 - Robô Titan VIII (Siegwart, 2004).....	22
Figura 2.5 - Arquitetura de controle dos robôs TITANS (Ridderström, 2003). ....	23
Figura 2.6 - Robô BISAM (Albiez, 2001). ....	24
Figura 2.7 - Arquitetura de controle do BISAM (Albiez, 2001).....	25
Figura 2.8 - Malha de Controle do BISAM (Albiez, 2001).....	26
Figura 3.1 – Visão geral da arquitetura de controle do Guará. ....	32
Figura 3.2 – Estrutura do software do nível supervisor de controle do Guará. ....	37
Figura 3.3 – (a) Interface do nível supervisor de controle (Bento, 2007); (b) Interface de teste para sintonia dos controladores PID e nebulosos. ....	39
Figura 3.4 - Fluxograma do corpo principal do nível coordenador de controle. ....	41
Figura 3.5 - Fluxograma da rotina de devolução de posições atuais e byte colisão. ....	42
Figura 3.6 – Fluxograma do nível atuador de controle de uma perna. ....	44
Figura 3.7 – Fluxograma da rotina de tratamento de colisão.....	44
Figura 3.8 - Formatação de uma mensagem CAN padrão.....	46
Figura 4.1 – (a) Condição de equilíbrio; (b) Condição de desequilíbrio. ....	52
Figura 4.2 - Ilustração de reação ao desequilíbrio. ....	53

Figura 4.3 – (a) Estratégia de controle e geração de comportamentos reflexivos baseados em modelos; (b) Estratégia de controle baseada em Inteligência Artificial para geração de padrões de comportamentos com reflexos. ....	54
Figura 4.4 - Processos para controle da estabilidade de equilíbrio do Guará. ....	56
Figura 4.5 – (a) Balanço da plataforma (vista frontal); (b) Vista de cima com projeção do CG sobre o triângulo de apoio das patas; (c) Vista de cima com projeção do CG sobre o triângulo de apoio das patas, sem balanço lateral (redução da margem de estabilidade).....	59
Figura 4.6 - Esquema elétrico do acelerômetro ADXL-202E ( <i>Analog Devices</i> , 2000).....	61
Figura 4.7 - Posicionamento do acelerômetro no corpo do Guará.....	62
Figura 4.8 - Condicionamento do sinal do acelerômetro. ....	62
Figura 4.9 - Postura resultante de alguns reflexos de estabilidade do Guará.....	64
Figura 4.10 – (a) Vista lateral simplificada do Guará com fixação de sistemas de referência na convenção Denavit-Hartenberg; (b) Vista lateral simplificada do Guará na postura necessária para compensação de mergulho da plataforma. ....	66
Figura 4.11 – (a) Vista frontal simplificada do Guará com fixação de sistemas de referência na convenção Denavit-Hartenberg; (b) Vista frontal simplificada do Guará na postura necessária para compensação de rolagem da plataforma. ....	68
Figura 4.12 - Malha de controle para geração dos reflexos de estabilidade. ....	71
Figura 4.13 – (a) Funções de pertinência para os conjuntos nebulosos de entrada; (b) Funções de pertinência para os conjuntos nebulosos de saída. ....	72
Figura 4.14 – (a) Instabilidade de equilíbrio gerado por inclinação da plataforma; (b) reflexo gerado para correção da postura da plataforma. ....	74
Figura 4.15 – (a) Instabilidade de equilíbrio gerada por inclinação de rolagem; (b) reflexo gerado para correção da postura da plataforma.....	75
Figura 5.1 - Diagrama elétrico do nível coordenador de controle de uma perna do Guará.....	80
Figura 5.2 – Diagrama elétrico do hardware de controle de uma perna. ....	82
Figura 5.3 – Ordem de prioridade das mensagens utilizadas no controle do Guará.....	85
Figura 5.4 - Fluxo de transmissão de posições de referência do nível supervisor de controle para o nível coordenador.....	86
Figura 5.5 - Atualização das posições de referência enviadas do nível coordenador para o nível atuador de controle. ....	86
Figura 5.6 - Devolução de “Acknowledgments” referentes às posições de referência recebidas no nível coordenador de controle. ....	87

Figura 5.7 - Propagação ( <i>broadcast</i> ) do comando “Executar”.	87
Figura 5.8 - (a) Devolução das posições reais das juntas das pernas do nível atuador de controle para o nível coordenador; (b) Devolução das posições reais das juntas das pernas do nível coordenador de controle para o nível supervisor.	88
Figura 5.9 - Detecção da colisão, propagação do <i>flag</i> colisão para todos os processadores do nível atuador de controle, e propagação do <i>byte</i> “estado das chaves detectoras” ou “ <i>byte</i> colisão” para o nível coordenador de controle.	89
Figura 5.10 - Propagação do <i>byte</i> colisão.	90
Figura 5.11 - Propagação dos valores obtidos do acelerômetro.	91
Figura 5.12 - (a) Início do processamento dos reflexos; (b) Finalização do processamento dos reflexos.	92
Figura 5.13 – Sequência de movimentos da andadura, para locomoção em trajetória retilínea. (a) Balanço transversal à esquerda para vôo das pernas 2 e 3; (b) Vôo da perna 3; (c) Vôo da perna 2; (d) Balanço transversal à direita para vôo das pernas 1 e 0; (e) Vôo da perna 1; (f) Vôo da perna 0.	94
Figura 5.14 - Sequência de movimentos da andadura, para locomoção em trajetória curvilínea; (a) Balanço transversal à esquerda para vôo das pernas 2 e 3; (b) Vôo da perna 2; (c) Balanço transversal à direita para vôo das pernas 0 e 1; (d) Vôo da perna 1.	95
Figura 5.15 - Nomenclatura de referência para os movimentos do robô e as repostas do acelerômetro.	96
Figura 5.16 - Resposta do acelerômetro na direção longitudinal da plataforma do Guará.	97
Figura 5.17 - Resposta do acelerômetro na direção transversal da plataforma do Guará.	98
Figura 5.18 – (a) Vista lateral do Guará em postura de início de locomoção; (b) Vista lateral do Guará submetido a uma inclinação de mergulho do plano de locomoção; (c) Vista lateral do Guará em postura de reação à inclinação de mergulho.	100
Figura 5.19 – (a) Vista frontal do Guará em postura de início de locomoção; (b) Vista frontal do Guará submetido a uma inclinação de rolagem do plano de locomoção; (c) Vista frontal do Guará em postura de reação à inclinação de rolagem.	101
Figura 5.20 - (a) Conjuntos nebulosos para classificação de $ACEL_X$ ; (b) Conjuntos nebulosos para classificação de $ACEL_Y$ .	102

Figura 5.21 - Conjuntos nebulosos para definição do acionamento das juntas (defuzificação).....	103
Figura 5.22 – Teste de reação à rolagem. ....	105
Figura 5.23 - Teste de reação ao mergulho.....	105
Figura 5.24 – Comportamento de $ACEL_X$ para instabilidade de inclinação de mergulho sem a ação de reflexos de estabilidade.....	106
Figura 5.25 - Comportamento de $ACEL_Y$ para instabilidade de inclinação de rolagem sem a ação de reflexos de estabilidade. ....	107
Figura 5.26 – Resposta do acelerômetro à inclinação forçada de mergulho do plano de locomoção. ....	108
Figura 5.27 – Reflexo de compensação à inclinação sobre pernas dianteiras, mergulho positivo. ....	109
Figura 5.28 - Reflexo de compensação à inclinação sobre pernas traseiras, mergulho negativo. ....	110
Figura 5.29 - Resposta do acelerômetro à inclinação forçada de rolagem do plano de locomoção. ....	111
Figura 5.30 - Reflexo de compensação à inclinação transversal, com reflexo composto de rolagem e mergulho.....	112
Figura 5.31 – Reflexo para correção de erro na postura causado por geração incorreta de referências. ....	113
Figura 5.32 – Diagrama de estados utilizados para realização do teste de reflexos durante a execução de andadura. ....	114
Figura 5.33 – Fases do teste de reflexos de estabilidade durante a locomoção do Guará. ....	115

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Análise comparativa entre sistemas de locomoção.....	4
Tabela 2.1 – Características de controle do robôs abordados. ....	27
Tabela 3.1 - Funcionalidade dos níveis de controle.....	33
Tabela 3.2 - Objeto de mensagem CAN do controlador INTEL 82527. ....	46
Tabela 3.3 – Campos de uma mensagem CAN no formato padrão (INTEL, 1996).....	47
Tabela 3.4 – Exemplo de disputa de três mensagens pelo barramento CAN. ....	47
Tabela 4.1 - Relação entre sinal do acelerômetro e reflexo disparado. ....	65
Tabela 4.2 - Modelo do banco de regras comportamentais. ....	73
Tabela 5.1 - Tabela dos identificadores das mensagens CAN.....	83
Tabela 5.2 – Mensagens transmitidas pelo objeto 1 ao nível coordenador de controle.....	84
Tabela 5.3 - Tabela da análise de $ACEL_X$ e $ACEL_Y$ para execução de andadura. ....	98



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A disponibilidade atual de microcontroladores com alto desempenho de processamento (velocidade e diversidade de recursos em *software* e *hardware*) e baixo custo, define uma importante contribuição para os projetos de sistemas de controle no que tange a modularidade (controle distribuído), portabilidade e robustez. Esta condição estimula a pesquisa de soluções para problemas relativos à sobrecarga de processamento (controle centralizado) e complexidade/custo de expansão nos sistemas de controle, além de viabilizar estratégias para o controle em tempo real (Kopetz, 1998).

Em paralelo ao desenvolvimento da microeletrônica, também ocorrem avanços na implementação de protocolos de comunicação. Visando as aplicações de controle em tempo real, os protocolos apresentam redução de camadas entre o nível de aplicação e o nível físico, métodos de arbitragem de prioridades não-destrutivos, requisição remota de mensagens, confinamento de falhas, dentre outras características que contribuem para o ganho na velocidade de transmissão e redução na taxa de perda de mensagens (Holzman, 1991).

Com base nestes recursos, torna-se possível dotar as arquiteturas de controle para robôs móveis das seguintes características (Murphy, 2000):

- Escalabilidade: distribuição hierárquica de funções nas distintas camadas da arquitetura.
- Eficiência: velocidade de processamento compatível com tarefas de controle em tempo real, e capacidade simultânea de detecção e correção de falhas.
- Generalidade: possibilidade de diversificação de aplicações.

A difusão da comercialização e uso dos recursos de *software* e *hardware* necessários à implementação de sistemas automatizados aumenta continuamente o leque de aplicações, que se restringia, há algumas décadas, ao setor industrial. Na atualidade, podemos citar:

- a) automação residencial;
- b) automação automotiva;
- c) sistemas de segurança patrimonial;
- d) robótica industrial (robôs manipuladores);
- e) robótica móvel;
- f) máquinas-ferramenta.

Esta conjuntura impulsiona pesquisas em todo o mundo, com o objetivo de melhorar o desempenho das arquiteturas de controle, aumentar o grau de automação de processos mecanizados e baixar o custo de implantação dos mesmos.

Assim sendo, o PPGEE-UFES (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo) iniciou na década de 90 pesquisas em Robótica Móvel desenvolvendo os projetos dos robôs Brutus (robô a rodas) (Lima, 1995) e Roque (robô quadrúpede) (Ishihara, 1998).

O projeto do Roque teve como meta propor uma arquitetura de controle que garantisse a locomoção de um robô quadrúpede em trajetórias retilíneas sem obstáculos, sendo uma plataforma de validação de andaduras para robôs quadrúpedes. O sucesso obtido com o projeto do Roque tornou-se um forte incentivo para o seguinte projeto de pesquisa:

- Projeto e implementação de uma arquitetura de controle que permita a um robô quadrúpede a locomoção (trajetórias retilíneas e curvilíneas) com transposição de obstáculos (saliências retangulares, depressões retangulares) e manutenção do equilíbrio, evitando a ocorrência de quedas.

Surge então o projeto de construção do robô Guará, que propõe a implementação de uma arquitetura de controle hierárquico sobre a qual serão definidos comportamentos reflexivos para estabilidade de equilíbrio. Os reflexos são gerados com uso de um controlador nebuloso, a partir das informações de um acelerômetro de dois eixos.

O tratamento das informações geradas pelo acelerômetro de dois eixos vinculado à plataforma do Guará, e a geração de reflexos para manutenção da estabilidade de equilíbrio a partir destas informações, estabelecem o problema a ser abordado. Nesta tese, apresenta-se uma hipótese de solução para o problema citado, e a investigação experimental sobre a validade desta solução.

## 1.2 O SISTEMA DE LOCOMOÇÃO

Os sistemas de locomoção de robôs móveis em ambiente terrestre enquadram-se em três grandes grupos: rodas, esteiras e pernas.

As pesquisas em robótica móvel exploram estes três sistemas de locomoção e também a mescla destes sistemas em um mesmo robô, sendo o objetivo destes estudos a adaptação dos robôs às diversas aplicações existentes, tanto em ambientes fechados e estruturados ou semi-estruturados, como em ambientes abertos não estruturados. A adaptação do robô à tarefa alvo deve considerar a minimização da relação custo e complexidade de controle quanto a eficiência de execução da tarefa.

A Figura 1.1 ilustra os três sistemas citados, sendo que os robôs apresentados destinam-se a distintas aplicações. O robô a rodas aqui citado tem por objetivo a navegação em ambiente aberto não estruturado, já os robôs a esteira e a pernas ilustrados nesta figura são utilizados em aplicações para ambientes fechados, razão pela qual pode-se observar uma explícita distinção na estrutura destes robôs.

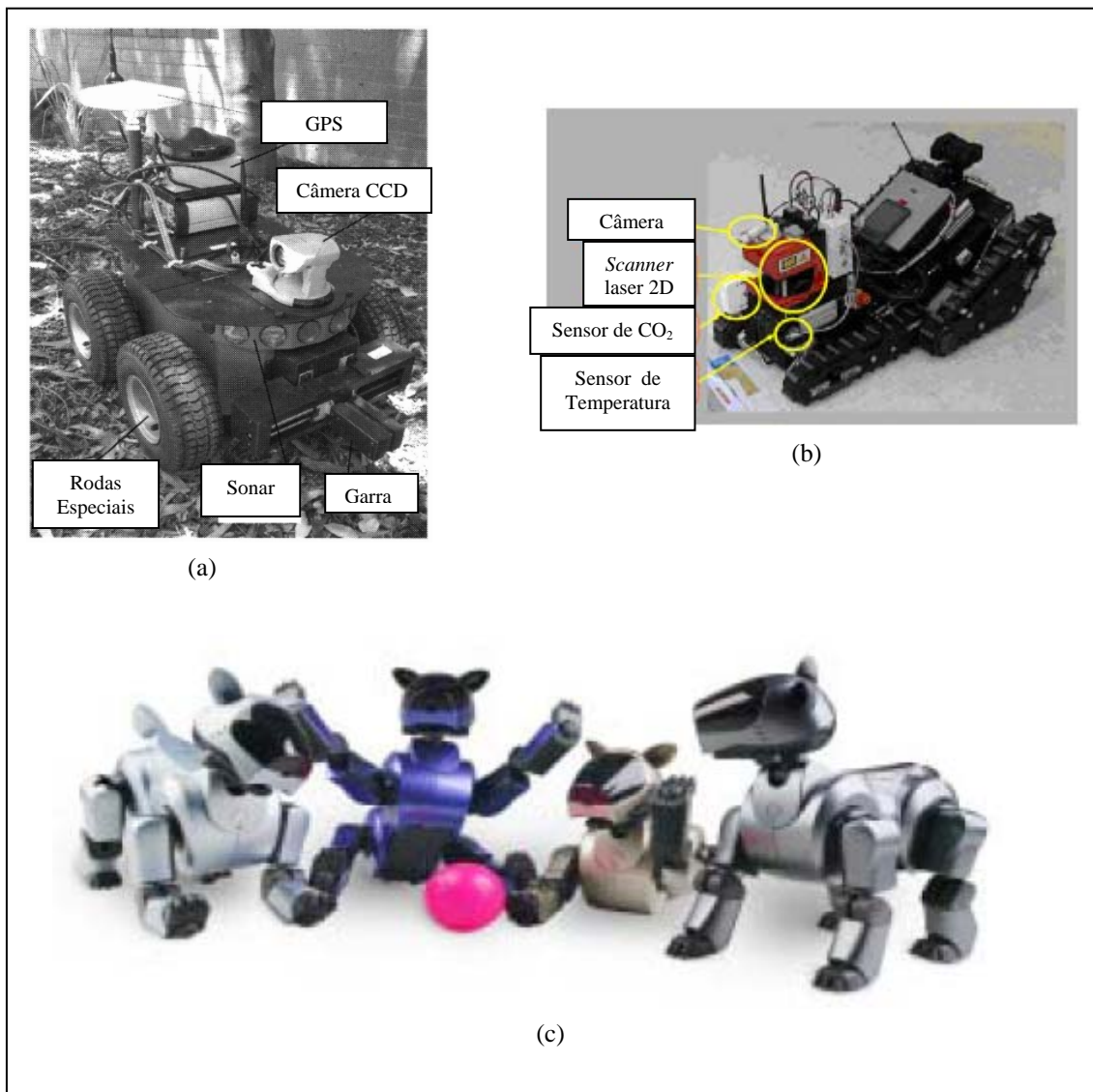


Figura 1.1 - Sistemas de locomoção: (a) Robô a rodas Pioneer-AT (Pathirana, 2005); (b) Robô a esteira ROBHAZ (Kang, 2005); (c) Robô a pernas AIBO-SONY (Decuir, 2004).

A escolha do sistema a ser utilizado depende da aplicação a que se propõe o robô e das características do ambiente a ser explorado. A Tabela 1.1 resume uma comparação qualitativa referente a quatro características inerentes a estes sistemas de locomoção, sendo que o sentido das setas aponta para a maior graduação de cada característica.

Tabela 1.1 - Análise comparativa entre sistemas de locomoção.

Sistema de Locomoção	Complexidade Construtiva	Complexidade de Controle	Velocidade de Locomoção	Dificuldade na Transposição de Obstáculos
Pernas	ALTA	ALTA	BAIXA	BAIXA
Esteiras	↑	↑	↓	↓
Rodas				
	BAIXA	BAIXA	ALTA	ALTA

A escolha do uso de pernas para o desenvolvimento do projeto desta tese se baseia nas seguintes considerações:

- a) a configuração construtiva de uma perna para um quadrúpede que possa realizar trajetórias retilíneas e curvilíneas, subida e descida de declives, agachamento, dentre outros movimentos, exige o uso de mais de um grau de liberdade (atuadores) por perna (Kang, 2003). Esta condição, vinculada aos objetivos de otimização da relação *hardware* disponível por tarefa, modularização e escalonamento, sugerem o uso de controle distribuído (Briskin et al., 2003) que é objeto de interesse de pesquisa nesta tese.
- b) tendo em vista o interesse em dotar o robô da capacidade de transpor obstáculos, vale ressaltar que o uso de pernas apresenta características relevantes, como variedade de posturas por combinação dos movimentos de cada perna (Konno, 2003), atrativa relação entre dimensão das pernas e dimensão de obstáculos transponíveis e versatilidade para a retomada de equilíbrio da plataforma a partir de uma condição de instabilidade (Dillmann, 2004).
- c) a continuidade dos estudos iniciados no projeto do Roque, bem como a integração com o projeto de implementação do nível supervisor de controle desenvolvido por (Bento, 2007).

Definido o sistema de locomoção a ser utilizado, inicia-se a análise dos paradigmas de controle vigentes para a definição daquele que sustentará a arquitetura de controle proposta.

### 1.3 O PARADIGMA DE CONTROLE

O histórico de evolução dos paradigmas de controle para robôs móveis registra que, inicialmente, em meados da década de 60, as arquiteturas de controle eram estruturadas com atribuição de funções fixas e rigidamente delimitadas a níveis hierárquicos distintos. Este paradigma de controle é denominado hierárquico e estabelece a divisão da arquitetura em um nível de controle deliberativo subdividido em supervisão e planejamento, e um segundo nível de controle atuador que só executa ações definidas pelo nível deliberativo (Murphy, 2000).

A evolução deste paradigma define maior grau de interação entre níveis hierárquicos e a subdivisão destes, como é apresentado por (Albus, 1988), o que proporciona o projeto de arquiteturas de controle mais robustas (distribuição no fluxo de informações) conforme ilustrada a Figura 1.2.

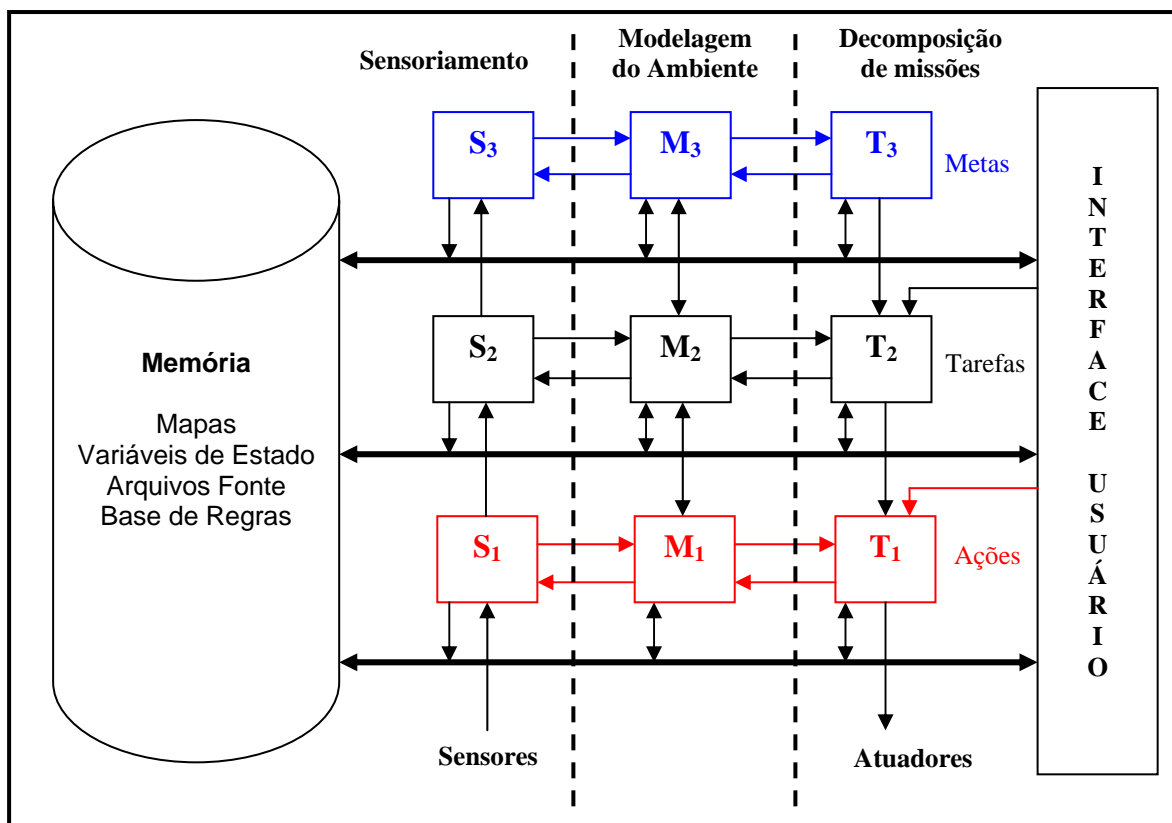


Figura 1.2 - Arquitetura de Controle Hierárquico para Robôs Móveis (Albus et al, 1988).

Na arquitetura da Figura 1.2 pode-se observar a hierarquização através da sequência definida para as macro-funções, pela qual a partir do sensoriamento, obtém-se a modelagem do ambiente e então é realizada a decomposição das missões. Também é importante ressaltar a divisão hierárquica no tratamento da busca por um alvo, no qual missões decompõem-se em metas (exemplo, buscar a saída de um ambiente) em tarefas (locomotoção com transposição de obstáculos) e estas últimas em ações finais (controle de movimentos dos atuadores).

Entretanto, para cada macro-função ou nível de execução de uma missão, há uma bidirecional comunicação entre os módulos componentes seja de forma direta ou por intermédio da memória do sistema, o que flexibiliza o processamento de dados na arquitetura de controle.

Com o objetivo de minimizar o custo computacional das arquiteturas hierárquicas de controle, desenvolvem-se paralelamente pesquisas que buscam definir ações de controle orientadas pela reação do robô aos estímulos recebidos do ambiente de navegação. Este é o princípio básico de sustentação do paradigma de controle “reativo”, e as pesquisas referentes a este paradigma atingiram um momento de evidência no início da década de 80, quando Rodney Brooks lança a arquitetura de subsunção, constituída de comportamentos reativos organizados em camadas que interagem entre si por supressão (Brooks, 1986).

A Figura 1.3 ilustra a estrutura da arquitetura de subsunção proposta por Brooks.

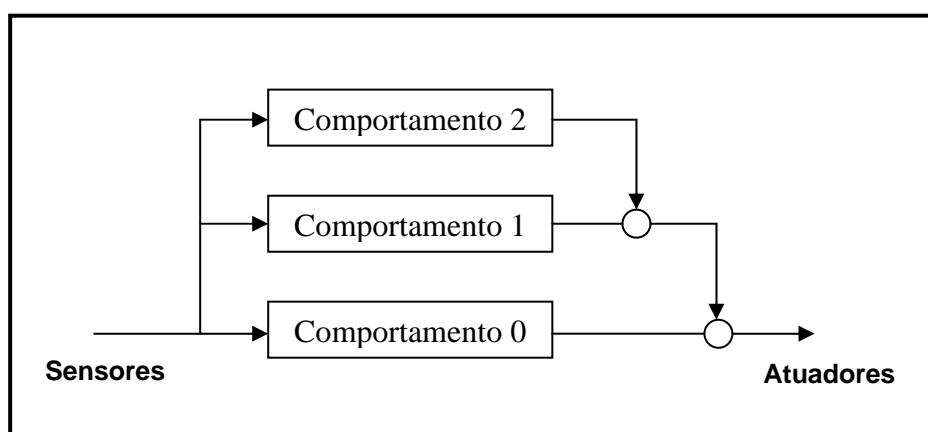


Figura 1.3 - Arquitetura Subsumção (Brooks, 1986)

Nesta arquitetura o comportamento 2 é o de maior prioridade podendo suprimir a ação do comportamento 1, e este por sua vez é prioritário em relação ao comportamento 0.

Apesar da redução em complexidade e custo computacional, e do ganho na velocidade de reação e no grau de adaptação a ambientes não estruturados, o emprego de arquiteturas de controle puramente reativas restringe a abrangência de tarefas. A realização de tarefas compostas por busca de alvo, coleta de informações ambientais (mapeamento), e restrição temporal rígida (*hard deadline*) exigem, além da reação, supervisão e planejamento.

Visando integrar as vantagens do paradigma hierárquico e do paradigma reativo surgem na década de 90 diversos projetos de pesquisa mesclando em uma mesma arquitetura estes paradigmas. Desta mescla nasce o paradigma de controle “híbrido” (Dudek, 2000) (Huang et al., 2006) dando origem a arquiteturas de controle como a ilustrada na Figura 1.4.

As arquiteturas de controle híbrido caracterizam-se pela disponibilidade da geração de comportamentos e ações de forma deliberativa (com encadeamento de supervisão, modelagem e planejamento), e também a geração de comportamento reflexivo para definir todas as ações do robô suprimindo o controle hierárquico.

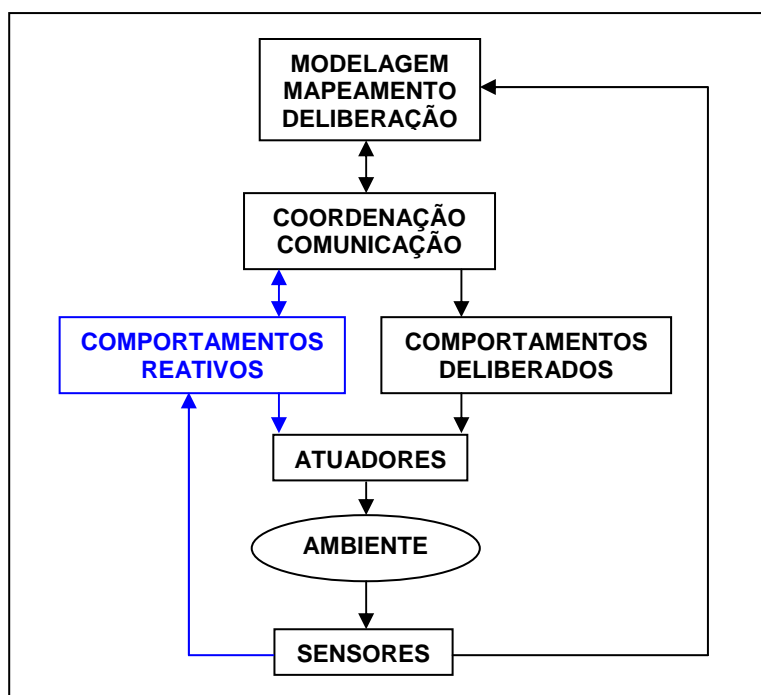


Figura 1.4 - Arquitetura de controle híbrido (Huang et al., 2006).

Para o desenvolvimento desta tese, a escolha do paradigma de controle hierárquico teve como fator preponderante o interesse no processamento dos modelos cinemático direto e cinemático inverso, com o objetivo de permitir a construção de algoritmos para locomoção e transposição de obstáculos (Bento, 2007), bem como o tratamento de informações geradas em um sistema de visão. Para o tratamento matemático dos modelos cinemáticos, o processamento de imagens, o uso de interfaces para simulações gráficas, depuração de erros e monitoramento das tarefas realizadas em tempo de execução, é utilizada uma unidade processadora que concentra estas funções em um nível supervisor de controle.

Assim, pode-se utilizar nos níveis hierárquicos de controle inferiores (coordenador e atuador) controladores com arquiteturas de baixo custo, uma vez que a estes níveis ficam atribuídas tarefas de complexidade inferior.

Definidos o sistema de locomoção e o paradigma de controle para o desenvolvimento da arquitetura proposta, pode-se apresentar a arquitetura hierárquica de controle implementada para o Guará, assim como explicitar o problema a ser investigado neste projeto.

## 1.4 DESCRIÇÃO DA ARQUITETURA DE CONTROLE PROPOSTA

Para melhor explicitar o vínculo de referência do projeto apresentado nesta tese com o universo da robótica móvel, a Figura 1.5 apresenta um diagrama de classificação simplificado para a arquitetura de controle proposta no projeto do Guará.

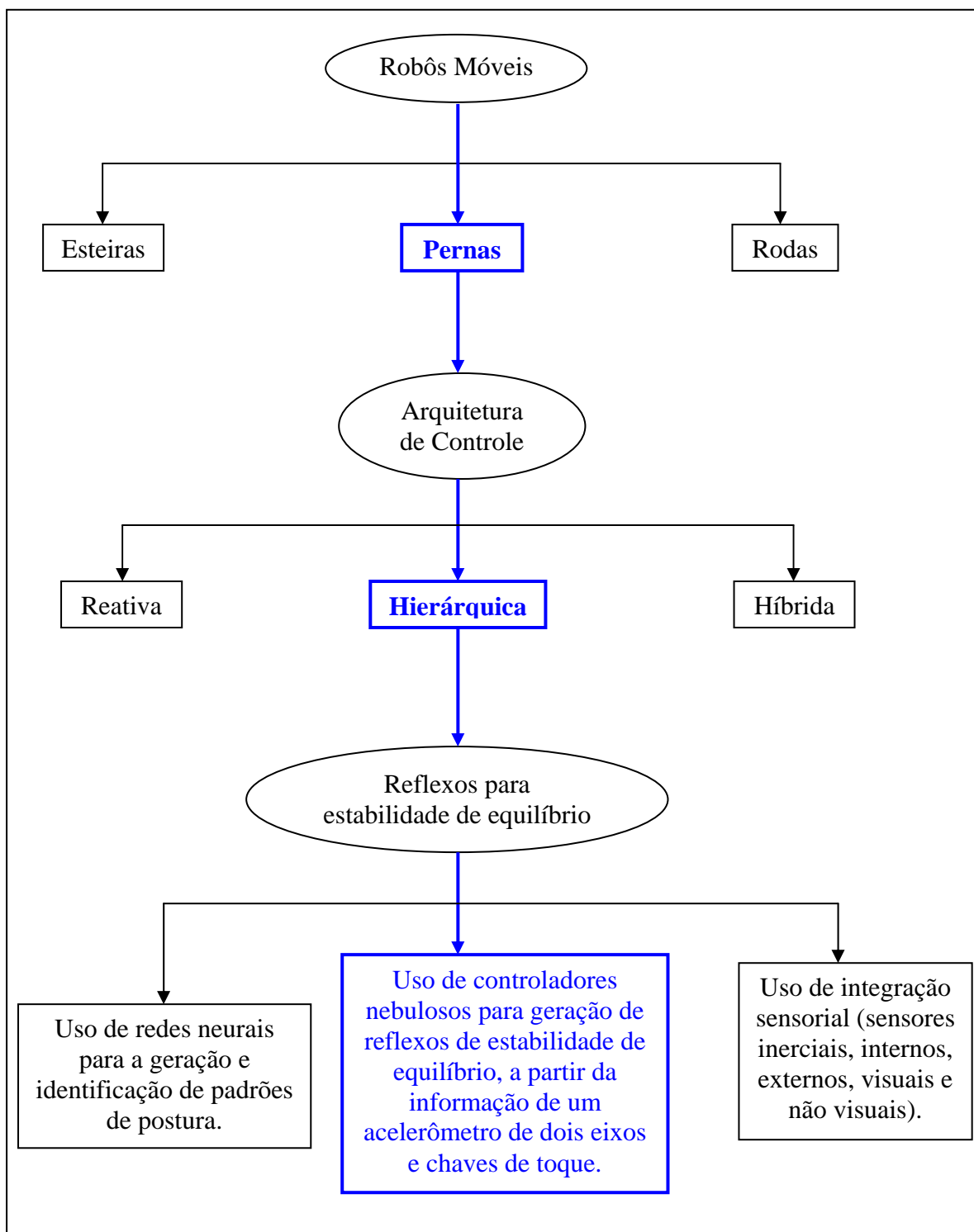


Figura 1.5 - Diagrama de classificação da arquitetura proposta para o Guará.

Vale ressaltar que o uso da lógica nebulosa para geração dos reflexos de estabilidade tem por objetivo, a independência quanto ao processamento de modelos e quanto à necessidade de influência do nível supervisor de controle sobre a obtenção dos reflexos.

A partir da escolha do sistema de locomoção, da escolha do paradigma de controle e da descrição do problema a ser investigado, torna-se possível apresentarmos a arquitetura de



controle proposta para o Guará. Esta arquitetura divide-se em três níveis de controle, que são o nível supervisor (nível hierárquico mais alto), o nível coordenador (nível hierárquico intermediário) e o nível atuador (nível hierárquico mais baixo). Estes níveis de controle podem ser caracterizados da seguinte forma:

- **nível de controle supervisor:** possui o mais alto grau hierárquico, sendo responsável pela tomada de decisões com base no modelo cinemático do robô e na resposta sensorial obtida do nível de controle coordenador;
- **nível de controle coordenador:** com o grau hierárquico intermediário, estabelece a comunicação entre o nível supervisor e o nível atuador, sendo também responsável pela execução de comportamentos reativos durante a interação do robô com o ambiente de navegação;
- **nível de controle atuador:** é o de mais baixo grau hierárquico, sendo responsável pelo controle de posição executado sobre os graus de liberdade de cada perna, e também pela detecção de colisões das patas com os obstáculos presentes na trajetória realizada. Tanto o estado das posições atuais de cada junta da perna quanto o estado de colisão são transmitidos ao nível coordenador de controle, sendo esta realimentação também de responsabilidade do nível atuador.

A Figura 1.6 ilustra a inter-relação entre os três níveis de controle que constituem a arquitetura proposta, e também apresenta a funcionalidade de cada um destes níveis.

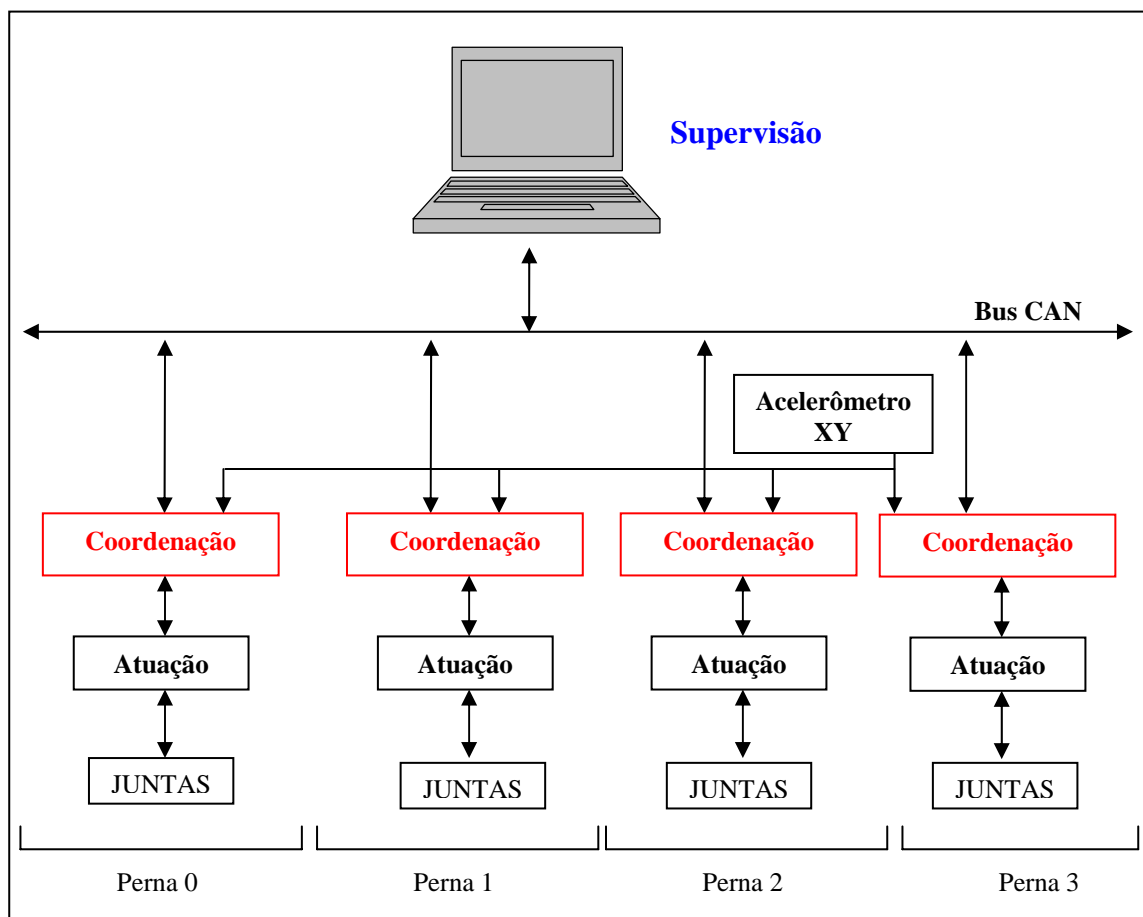


Figura 1.6 - Representação em blocos da arquitetura de controle do Guará.

Nesta arquitetura de controle o nível supervisor oferece recursos suficientes para que a supervisão e o processamento do modelo cinemático se expandam ao tratamento de imagens, processamento de estratégias de controle não convencionais (redes neurais e lógica nebulosa), construção de mapas do ambiente, e diversas outras funções. Também no nível atuador há uma flexibilidade de funções desempenhadas, uma vez que, além do acionamento das juntas de cada perna, neste nível é realizada a detecção de colisão com obstáculos, a reação em primeiro nível (parada imediata dos movimentos) e a realimentação ao nível coordenador do estado das pernas.

A comunicação entre os níveis de controle supervisor e atuador é realizada pelo nível coordenador de controle, que integra as funções de transmissão de dados bidirecional (de supervisor para atuador e vice-versa), sincronização de ações (troca de referências para o nível atuador), e ainda um segundo nível de reação com comportamentos reflexivos para estabilidade do robô.

Estas características favorecem a expansibilidade, e um bom nível de desempenho na realização das tarefas analisadas com a possibilidade de diversificação das mesmas.

Definidas as características principais da arquitetura de controle a ser utilizada, é importante detalhar o problema investigado, ou seja, a manutenção da estabilidade de equilíbrio do Guará e a hipótese de solução para este problema. Para auxiliar a compreensão da estrutura física do robô, a Figura 1.7 apresenta o projeto mecânico simplificado, no qual define-se a estrutura física de cada perna com seus graus de liberdade, a disposição das pernas

para sustentação do corpo principal (plataforma) e a estrutura física da plataforma com uma barra principal longitudinal tubular e 4 hastes transversais também tubulares.

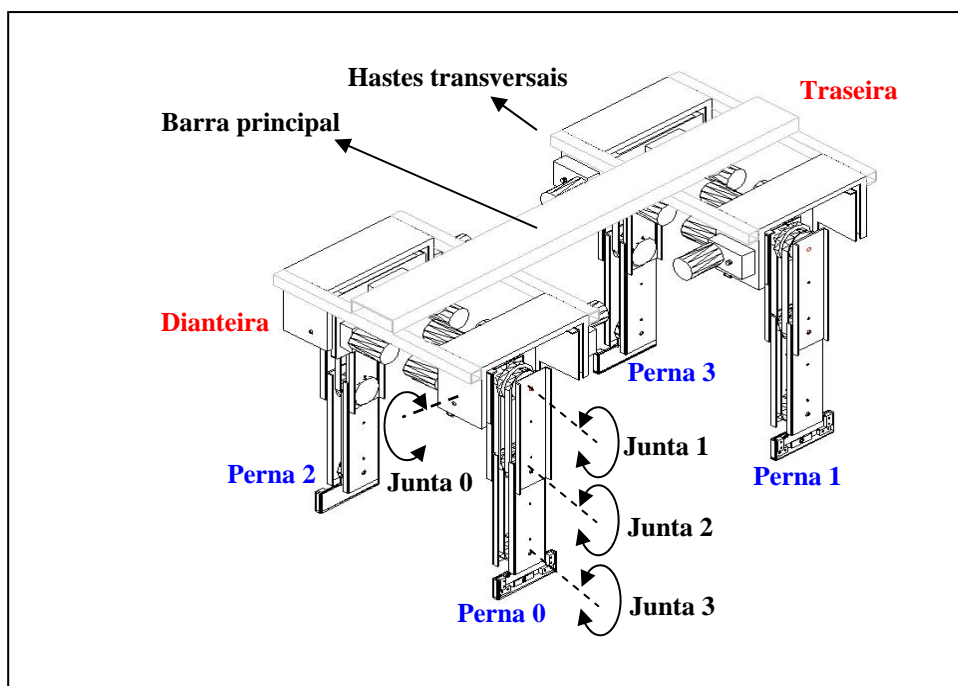


Figura 1.7 - Estrutura mecânica do Guará.

## 1.5 O PROBLEMA INVESTIGADO

A pesquisa desenvolvida apresenta um estudo e uma proposta de solução para o seguinte problema:

Como utilizar as informações obtidas de um acelerômetro de dois eixos para definir o estado de equilíbrio de um robô quadrúpede, e a partir deste estado de equilíbrio gerar, se necessário, reflexos para correção de postura do robô. Neste trabalho a instabilidade de equilíbrio é caracterizada pelo grau de inclinação da plataforma nas direções longitudinal e transversal (mergulho e rolagem) ao movimento da andadura.

Detectada a instabilidade de equilíbrio, também são utilizados sensores de toque (tato) nas patas e sensores de posição em cada junta (potenciômetros) com os quais define-se a postura do Guará, informação utilizada como condição inicial para a correção de postura e retomada da estabilidade de equilíbrio.

O uso de acelerômetros como fonte de informação para a geração de comportamentos reflexivos em robôs móveis, exige o tratamento das seguintes restrições: o alto nível de sensibilidade dos acelerômetros a ruídos elétricos e a geração de impulsos de aceleração provocados pelas vibrações mecânicas presentes na estrutura do robô durante a execução da andadura.

Entretanto, a solução proposta é motivada pelo baixo custo dos acelerômetros se comparados com giroscópios e outros sensores inerciais, e também é motivada pela possibilidade de definição da instabilidade de equilíbrio sem que necessariamente seja processado um modelo analítico para definição do estado de equilíbrio do robô. Vale ressaltar que, a inclinação da plataforma não necessariamente exige integração da aceleração

mensurada para indicação da instabilidade, o que contribui para a minimização da influência do *drift* (erro inerente a sensores inerciais) (Ojeda, 2002).

A hipótese de solução para o problema investigado nesta pesquisa é detectar com o uso do acelerômetro a tendência de desequilíbrio, realizar através das micro-chaves de toque e potenciômetros a leitura da postura atual do robô, e a partir destas informações com uso de um controlador nebuloso (definido para cada perna) gerar reflexos que corrijam a postura do Guará para a retomada da estabilidade de equilíbrio. Vale ressaltar que nesta proposta não há influência (processamento) do nível supervisor de controle para a retomada do equilíbrio.

As pesquisas atuais apresentam diversas estratégias para a definição de comportamentos reflexivos, fazendo uso de integração sensorial (acelerômetros, inclinômetros, giroscópios, sensores de colisão, sensores de força, processamento de imagem e outros), redes neurais para identificação de padrões de posturas, e também a lógica nebulosa para a definição de regras comportamentais.

O uso da integração sensorial estabelece alto grau de interação e adaptação do robô ao ambiente explorado, em função da riqueza de informações obtidas deste ambiente pelos distintos sensores utilizados. Entretanto, esta estratégia impõe alto custo de sensoriamento e a necessidade do processamento de modelos matemáticos (busca de informações relevantes em uma imagem, especificação de postura, odometria e etc) para a tomada de decisão, o que distancia os reflexos obtidos da naturalidade animal.

A aplicação de redes neurais no reconhecimento de padrões de postura para a geração de comportamentos reflexivos aproveita a capacidade de generalização destas redes, como ganho de adaptação do robô ao universo das condições exploradas no ambiente de navegação (estruturado, ou não-estruturado). Porém, esta estratégia aplicada ao Guará exigiria o treinamento da rede com a observação de 16 graus de liberdade e 16 chaves de contato para a definição da postura do robô, a partir da qual seria definida a reação de equilíbrio necessária.

Com o objetivo de redução do espaço de variáveis, e independência quanto ao processamento de modelos matemáticos para a definição das reações (custo computacional reduzido), o uso do acelerômetro (com definição de mergulho, rolagem), a observação das chaves de contato das patas, e a aplicação de controladores nebulosos, torna-se a opção escolhida para a geração dos reflexos do Guará.

Os controladores nebulosos utilizados (um em cada perna) definem em sincronismo a intensidade, o sentido, e a direção da reação a ser estabelecida por uma conjugação dos movimentos das quatro pernas, para permitir o equilíbrio da plataforma. A Figura 1.8 ilustra a estrutura de controle reflexivo definida para o Guará.

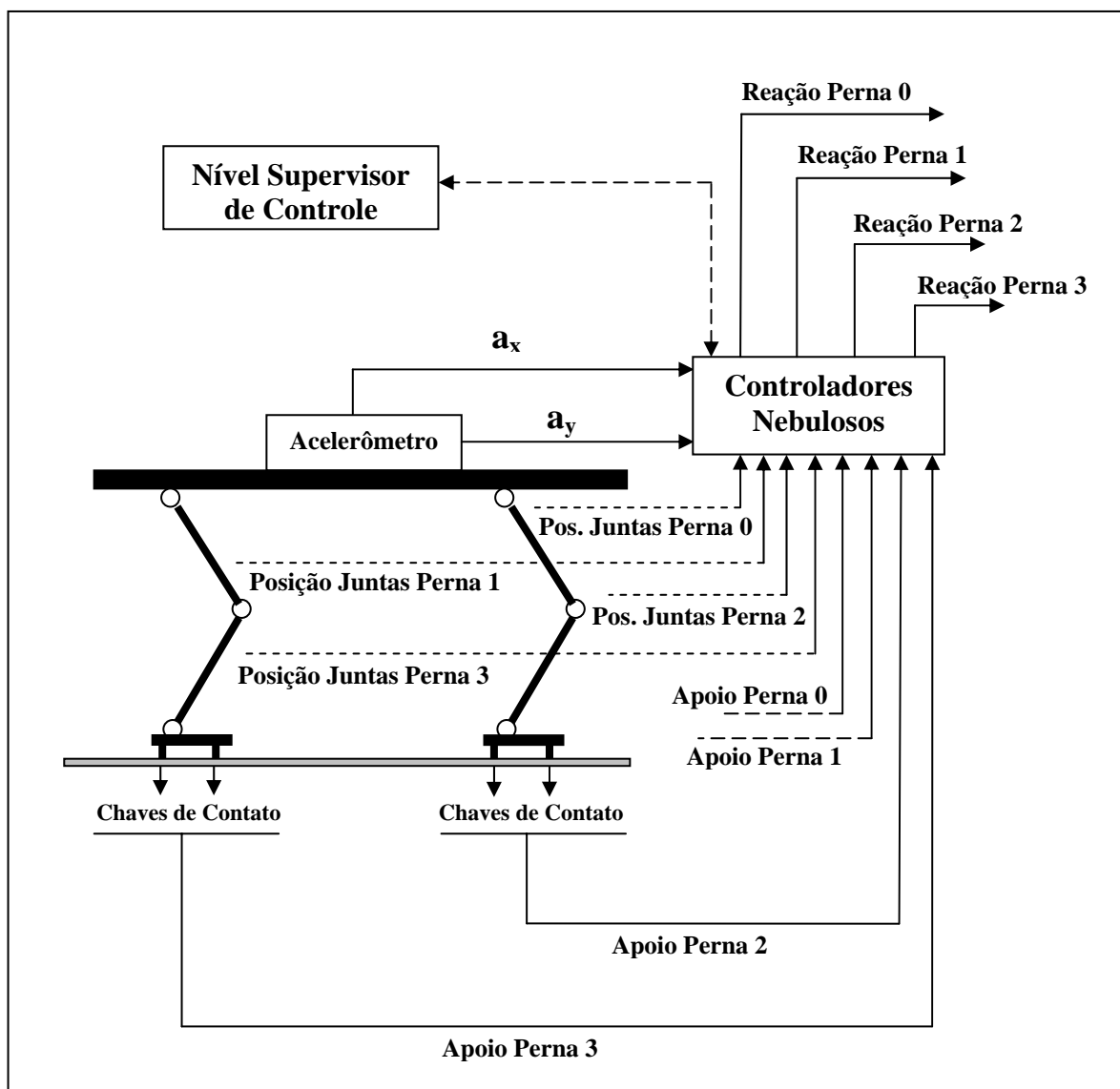


Figura 1.8 – Esquema de geração de reflexos para equilíbrio do Guará.

A estratégia proposta para geração da andadura do Guará, baseia-se na geração da trajetória (referências para as juntas das pernas) a partir de um modelo cinemático processado no nível supervisor de controle, e execução da mesma a partir dos níveis coordenador e atuador responsáveis pela distribuição de referências e controle de posição no movimento de cada uma das pernas durante a execução da andadura. Na ocorrência de instabilidade na andadura do robô, por inclinação indevida da plataforma, o controlador nebuloso assume a geração das referências necessárias para a definição das reações de equilíbrio, inibindo a ação do nível supervisor de controle.

Retomado o equilíbrio, o estado atual (postura) do robô é então informado ao nível supervisor de controle, para que este estado seja a referência inicial de uma nova trajetória. O detalhamento desta estratégia de controle é apresentado no Capítulo 4 desta tese.

A proposta de uso de um controlador nebuloso contribui para a eliminação do processamento de um modelo não-linear, necessário ao mapeamento entre o estado de apoio das pernas associado às acelerações medidas, e o universo de reações de equilíbrio. Esta simplificação reduz o custo computacional, e favorece a velocidade de execução dos

comportamentos reflexivos. Também é importante ressaltar que, sendo as reações definidas no nível coordenador de controle, a retomada do equilíbrio da plataforma não depende do nível supervisor (hierarquicamente mais alto), o que reforça o propósito desta arquitetura em viabilizar comportamentos reflexivos com curtos ciclos de execução, desde o surgimento dos estímulos até a geração das reações.

Vale lembrar que o primeiro nível de reação executado a partir da detecção de instabilidade de equilíbrio ou obstrução do movimento da andadura, é estabelecido no nível atuador de controle com a interrupção imediata dos movimentos das pernas.

Na busca da solução para o problema apresentado, a pesquisa constitui-se das seguintes etapas:

- a) análise de arquiteturas de controle e estratégias para implementação de reflexos utilizados para robôs quadrúpedes;
- b) análise dos aspectos construtivos do robô a ser controlado: definição da quantidade e tipo de atuadores, especificação de sensores, processadores, e escolha da topologia para a comunicação de dados;
- c) projetar e implementar a arquitetura de controle a ser utilizada (*hardware* e *software*) para execução de um passo com detecção de choque em apenas uma perna;
- d) projetar e implementar a arquitetura de comunicação (*hardware* e *software*) entre os blocos de controle de cada perna de modo a permitir o controle de andadura do robô;
- e) definir e implementar os comportamentos reflexivos disparados pelo acelerômetro e pelas micro-chaves de toque (detecção de colisão pelas patas);
- f) validar a arquitetura de controle do robô através da realização de trajetórias em ambiente estruturado, de superfície plana;
- g) validar os reflexos implementados submetendo o robô a condições de instabilidade de equilíbrio.

O robô constitui-se de uma estrutura mecânica tubular de alumínio para sustentação das quatro pernas e de todo *hardware* de controle, conforme ilustra a Figura 1.9.

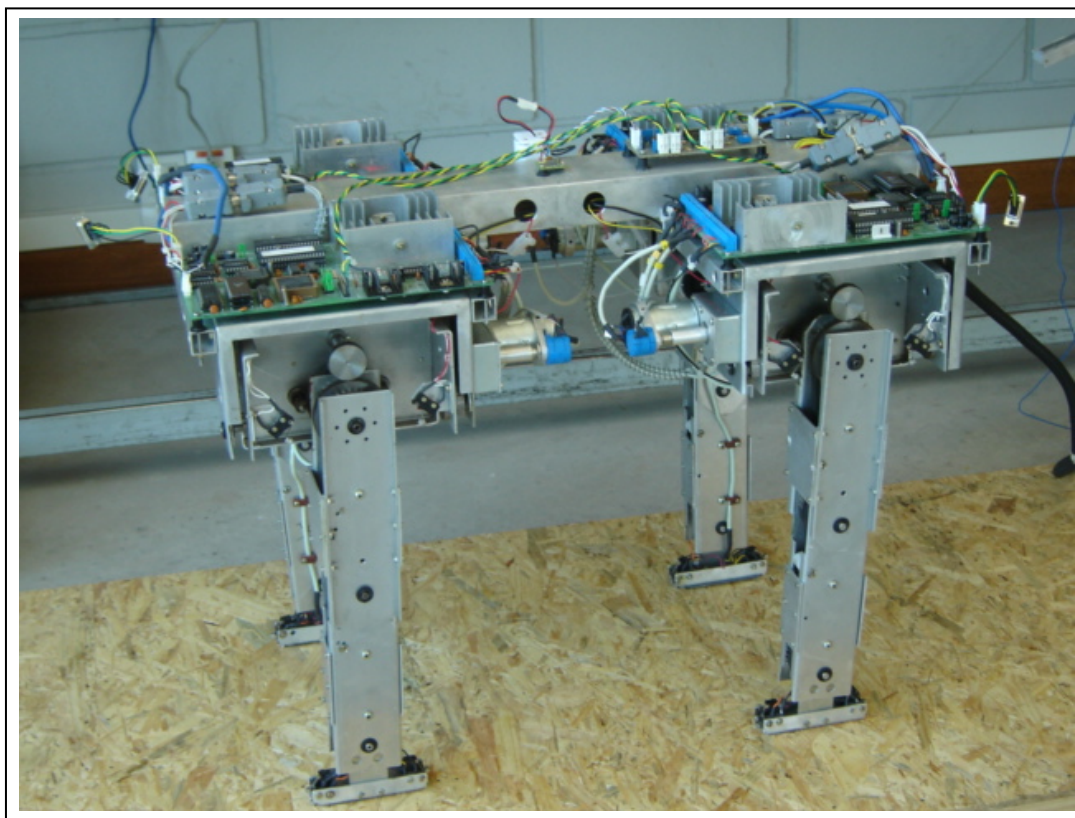


Figura 1.9 – Vista geral do Guará.

## 1.6 CONTRIBUIÇÕES DESTA PESQUISA

O Guará é uma plataforma de estudo para diversos problemas inerentes a robôs quadrúpedes. Alguns destes são:

projeto, implementação e análise de uma rede de microcontroladores, para um sistema de controle hierárquico, com enfoque sobre modelos e protocolos de comunicação;

estudo de estratégias de controle para um robô móvel a patas, definindo a geração de andaduras, a recuperação de posturas, transposição de aclives e declives e demais movimentos complexos;

implementação de reflexos para manutenção da estabilidade no equilíbrio;

aplicação de visão para suporte a navegação de robôs quadrúpedes.

Esta tese concentra atenção sobre os três primeiros problemas citados, ou seja, a implementação de uma rede de comunicação de dados que permita a execução do controle de locomoção de um robô quadrúpede com inclusão de transposição de obstáculos e interação com o ambiente de locomoção por meio de reflexos de estabilidade. A obtenção dos reflexos de estabilidade é a contribuição principal deste projeto, e está sustentada sobre três fatores, que são:

a apresentação do uso conjunto de sensores de baixo custo (acelerômetro micro-chaves e potenciômetros), e condicionamento dos sinais elétricos obtidos para extração das informações necessárias à definição de postura de um robô quadrúpede como estado de entrada do sistema de controle de equilíbrio;

a extração de informações de um acelerômetro, suficientes à definição de reflexos em um robô quadrúpede;

o uso de controladores nebulosos, permitindo a definição dos comportamentos reflexivos, sem necessariamente tratar analiticamente nos níveis coordenador e atuador de controle modelos matemáticos, o que proporciona velocidade de reação e baixo custo computacional para a manutenção de equilíbrio.

A arquitetura para o controle de locomoção do Guará é identificada pelo uso do paradigma hierárquico de controle, com uma rede de comunicação de dados expansível, restrita ao uso de sensoriamento interno não visual (acelerômetro, micro-chaves de toque e potenciômetro), e uso de comportamentos reativos para detecção de obstáculos e manutenção do equilíbrio do robô. Estas características contribuem para a redução do custo e complexidade computacional, permitem a realização de tarefas em ambientes estruturados, e não impedem a inclusão de módulos de controle que ampliem o universo de aplicações.

Um exemplo desta capacidade de diversificação de tarefas é a integração de um sistema de visão ao Guará, o que permite a exploração de ambientes desestruturados com identificação de obstáculos (Orlandi, 2007).

## 1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

A primeira etapa realizada foi uma pesquisa bibliográfica em busca de referenciar a distinção entre as estratégias de controle por meio do estudo de diversas arquiteturas utilizadas em robôs já existentes e similares ao Guará.

No Capítulo 2 desta tese é apresentada a síntese da pesquisa bibliográfica citada acima, sendo apresentadas e classificadas as arquiteturas de controle de diversos robôs quadrúpedes de acordo com os paradigmas de controle, e a partir desta exposição justifica-se a escolha da estratégia de controle hierárquico para o Guará.

Definido o problema a ser explorado, e o paradigma de controle, torna-se importante a apresentação da topologia (*software e hardware*) desta arquitetura. Desta forma pode-se discutir a relação custo/benefício para os recursos utilizados.

O Capítulo 3 apresenta uma visão geral da arquitetura de controle proposta para o Guará, detalhando a funcionalidade de cada nível hierárquico de controle, e a interação entre os mesmos.

Visando alcançar eficiência na comunicação (velocidade de transmissão, arbitragem de prioridades, e detecção de erros) entre as unidades de processamento, é necessária uma escolha criteriosa do protocolo de comunicação a ser utilizado. O Capítulo 3 também traz a análise realizada para a escolha da rede CAN utilizada na arquitetura proposta. Esta análise inclui um breve histórico de evolução do protocolo CAN a partir de seu projeto pela BOSCH em 1989 (Lawrenz, 1997), as características que o apontam como eficaz para uso em sistemas de controle em tempo real, e ainda as configurações definidas para uso da rede CAN neste projeto.

O Capítulo 4 detalha o problema em estudo nesta tese, cujo foco se divide em observação do estado de equilíbrio do Guará por meio de um acelerômetro e chaves de



contato das patas com a superfície de navegação, e a definição dos comportamentos reflexivos com uso de um controlador nebuloso. Neste capítulo descreve-se toda a metodologia utilizada, para extração da informação necessária à definição do estado de equilíbrio do Guará, a partir de um acelerômetro. Também são apresentados neste capítulo os comportamentos reflexivos definidos com uso do controlador nebuloso, sendo discutida a contribuição do uso desta estratégia para robôs quadrúpedes.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos no controle de locomoção do robô, que confirmam a validade do uso da arquitetura de controle proposta. Com base nas informações apresentadas neste capítulo, discute-se o desempenho do sistema de controle utilizado, ressaltando-se as influências e dependências deste sistema em relação ao paradigma de controle hierárquico e a aplicação a um robô móvel quadrúpede.

As conclusões finais desta pesquisa estão contidas no Capítulo 6, no qual se faz uma discussão sobre questões relevantes inerentes ao trabalho desenvolvido e também são apresentadas propostas para evolução trabalhos futuros.

O ANEXO apresenta alguns detalhes construtivos do Guará.

## 2 COMPORTAMENTOS REFLEXIVOS PARA O CONTROLE DE ROBÔS QUADRÚPEDES

Neste capítulo serão apresentadas arquiteturas de controle para robôs móveis quadrúpedes com uso de comportamentos reflexivos, de modo a permitir que os conhecimentos gerados em projetos similares sejam agregados ao desenvolvimento deste projeto, permitindo assim nova contribuição.

A tarefa de controlar de forma autônoma os movimentos de um sistema de locomoção vinculado a uma plataforma, objetivando a interação estável e segura deste conjunto com o ambiente no qual se encontra, é um desafio que absorve a atenção de muitos pesquisadores. Esta área de pesquisa é denominada Robótica Móvel, e atualmente vem sendo explorada através de diversas linhas de pesquisa, como a modelagem cinemática e dinâmica, materiais, arquiteturas de controle (*software* e *hardware*), definição de comportamentos, visão computacional, dentre outras.

Para que se discuta a respeito das características (vantagens e desvantagens) das arquiteturas de controle aplicáveis aos robôs a pernas, faz-se necessário uma abordagem prévia sobre definições de arquitetura de controle. Assim, são apresentadas três definições oriundas da pesquisa bibliográfica, as quais embasam o conceito de arquitetura de controle na atualidade e serão utilizadas para nortear este trabalho.

“A arquitetura estabelece a forma de organização de um sistema de controle (Mataric, 1992)”.

“Uma arquitetura descreve um conjunto de componentes e como estes podem interagir no controle de um processo (Dean, 1991)”.

“Uma arquitetura define o relacionamento existente entre as primitivas, sensoriamento, planejamento e ação, ou seja, como um dado sensoriado é processado para que possa suprir informação útil ao planejamento que definirá ações (Murphy, 2000)”.

Estes conceitos ressaltam “componentes (ou processos), interação e organização”, ou seja, a concepção da arquitetura proposta exige:

1. a escolha criteriosa dos componentes a serem utilizados, objetivando sempre a adequação às tarefas alvo e a otimização da relação custo/benefício;
2. a especificação dos meios e métodos de interação, desde os recursos físicos (projeto de *hardware*) até a escolha e concepção dos processos de controle e protocolos de comunicação (projeto de *software*);
3. e, finalmente, a organização do conjunto, de modo a garantir êxito em busca das metas desejadas (sincronismo de ações, prioridades).

Para que se possa avaliar a arquitetura proposta é necessária a observação de critérios que permitam evidenciar quão acertada foi a escolha dos componentes, a definição da interação entre estes e o nível de organização do todo.

## 2.1 CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DE UMA ARQUITETURA DE CONTROLE

A avaliação de uma arquitetura de controle a ser utilizada é muito importante para que se garanta a continuidade de um projeto, ou seja, que a arquitetura reúna características de expansibilidade, flexibilidade e robustez. Para isto, é necessário que não só na fase de concepção, mas também durante a implementação dos recursos de *software* e *hardware*, sejam constantemente observados os seguintes quesitos (Murphy, 2000; Dudek e Jenkin, 2000): precisão, portabilidade, e robustez.

O nível de desempenho obtido com uma arquitetura de controle na realização de suas tarefas está vinculado à escolha correta da tecnologia de fabricação, velocidade de processamento e demais características eletro-eletrônicas e mecânicas dos componentes utilizados, bem como aos recursos de interfaceamento entre os diversos componentes e as ferramentas de programação. Enfim, toda a composição da arquitetura, no que tange à estrutura física, e também quanto às estratégias de processamento utilizadas, exerce influência sobre o desempenho obtido nas tarefas a serem executadas. Vale ressaltar que a não observância destes fatores preponderantes sobre a precisão pode gerar erros cumulativos de difícil correção, a depender do estágio de evolução do projeto.

A portabilidade caracteriza a possibilidade de uso da arquitetura em aplicações distintas, como, por exemplo, outros robôs. A relevância quanto ao grau de portabilidade de uma arquitetura está na contribuição que ela pode proporcionar aos projetos distintos, permitindo evolução a partir dos recursos já disponibilizados, o que acelera o progresso simultâneo de várias frentes de pesquisa. Para favorecer o ganho de portabilidade da arquitetura, é muito relevante a atenção à escolha da linguagem de programação a ser utilizada, tendo em vista que sobre esta ferramenta necessariamente incidirão alterações para aplicações distintas, ainda que o paradigma de controle seja preservado.

A robustez estabelece a capacidade da arquitetura de manter um comportamento estável dentro da tolerância da precisão pré-estabelecida, ainda que estejam presentes (de forma contínua ou intermitente) fontes de erro, tais como ruídos, influências do ambiente, etc. Em se tratando de arquiteturas de controle para robôs móveis autônomos, cuja principal característica é a redução, ou eliminação, da interferência humana sobre as tarefas a serem realizadas, a robustez é um quesito de alta relevância. Esta característica é proporcionada por meio de recursos de proteção, em *hardware*, contra ruídos eletromagnéticos, falhas de conexão, sobre-elevação de temperatura, entre outros, bem como também é favorecida pela arquitetura de *software*, através da escolha adequada de protocolos de comunicação, otimização no gerenciamento de memória, estruturação e validação do código.

Então, para satisfazer aos critérios de avaliação, é necessária atenção a todas as etapas do projeto de implementação da arquitetura de controle. Também é importante a análise de arquiteturas de controle existentes para que consiga obter destas referências informações que norteiem a solução proposta.

## 2.2 ARQUITETURAS PARA CONTROLE DE ROBÔS QUADRÚPEDES

Para referenciar a implementação de arquiteturas de controle, são apresentados nesta seção alguns projetos de robôs quadrúpedes encontrados na pesquisa bibliográfica.

### 2.2.1 Robô “Patrush II” (Japão)

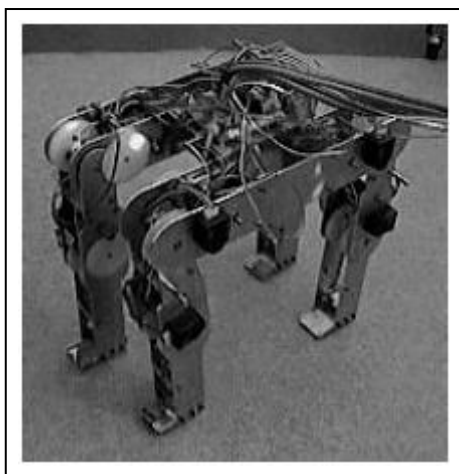


Figura 2.1 - Robô Patrush (Kimura, 2000).

- Estrutura eletro-mecânica: três graus de liberdade, todos controlados na direção de mergulho (não há grau de liberdade para rolagem), sendo dois ativos (ombro e joelho), acionados por moto-redutores cc de 18 W e com realimentação de posição por *encoders* ópticos, e o terceiro grau de liberdade passivo, fazendo a função do calcanhar da perna. O robô possui 33 cm de comprimento, 24 cm de largura e 33 cm de altura, com peso de 5,2 kg.
- Sensores: faz uso de giroscópio na plataforma (*encoder*), sensores de força nos *links* inferiores das pernas (abaixo dos joelhos) e microchaves nas patas, o que permite a realimentação de detecção de obstáculos e tipo de apoio das pernas sobre o solo, para a definição de reflexos.
- Arquitetura de controle: o robô é controlado por um computador padrão IBM-PC, com os algoritmos de controle programados em linguagem “C” e uso do RT-LINUX (*Real Time Linux*) e *TITECH-wire IO boards* (placas periféricas para a distribuição do controle central aos elementos atuadores).
- Estratégia de controle: as ações de controle são definidas com o uso de um modelo neural que constitui um gerador padrão de comportamentos, que integra também a geração de reflexos a partir do sensoramento de força nas pernas, orientação da plataforma e condição de contato com a superfície de navegação.

Na Figura 2.2 está ilustrada a estratégia de controle utilizada no Patrush para geração dos movimentos de uma perna e reação à detecção de obstáculos.

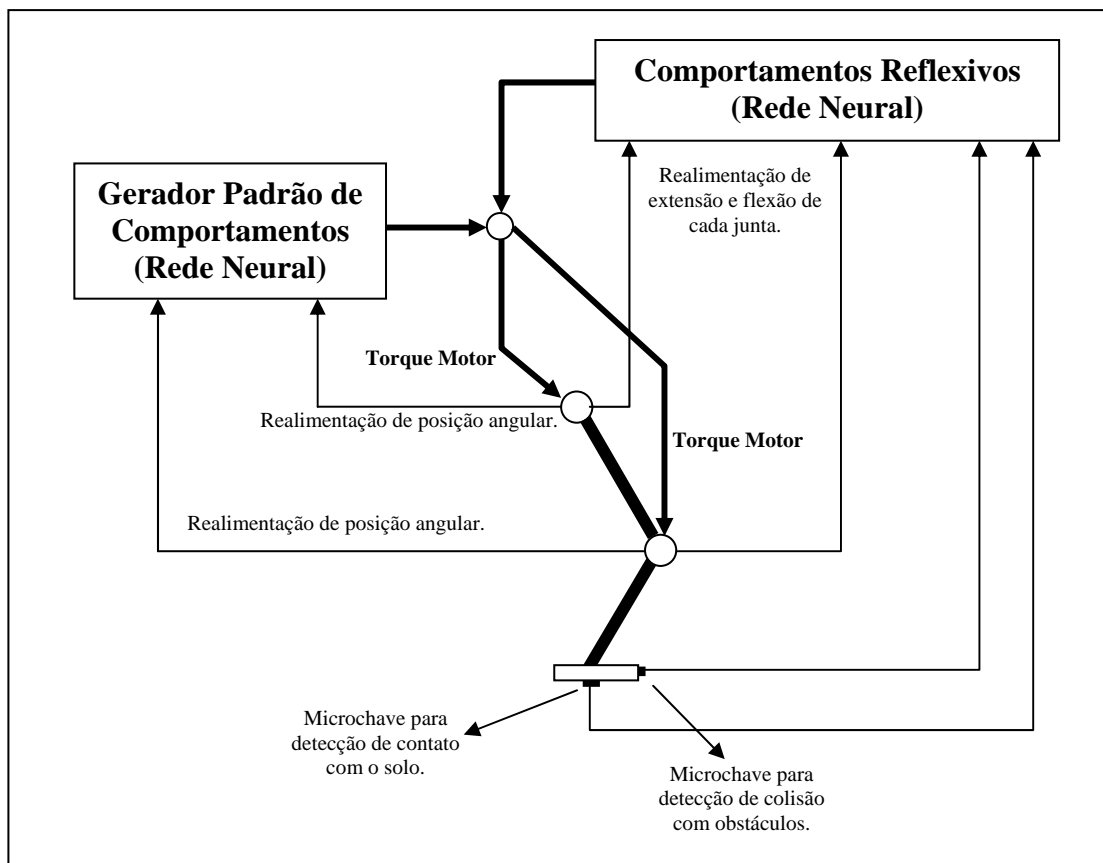


Figura 2.2 - Diagrama da estratégia de controle do Patrush II (Kimura, 2000).

A Figura 2.3 apresenta o Patrush na realização de uma trajetória com a transposição de obstáculos.

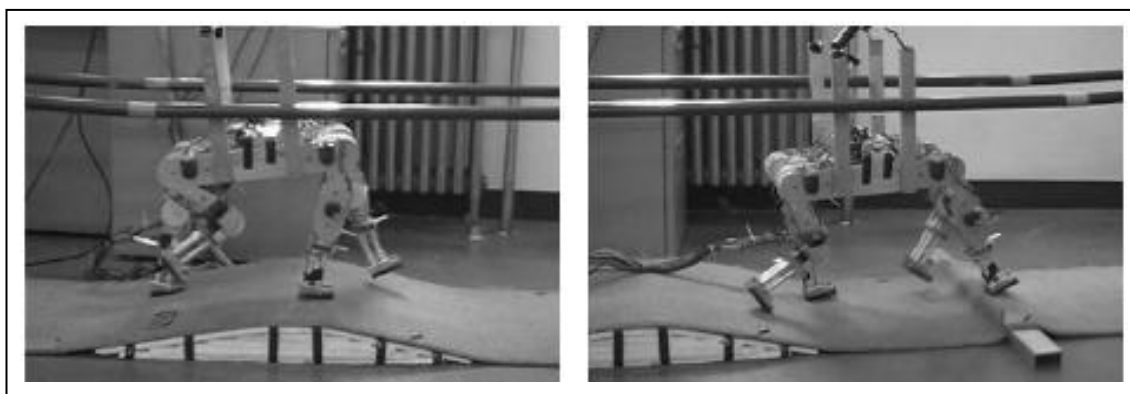


Figura 2.3 - Robô Patrush transpondo obstáculos (Kimura, 2000).

Pode-se observar na Figura 2.3 que a ausência de um grau de liberdade para rolagem da plataforma define uma restrição relevante à autonomia do robô. Torna-se necessário o uso de guias (hastes verticais fixadas no corpo do robô) para garantir o equilíbrio do mesmo quanto ao movimento de rolagem.

Na arquitetura de controle do PATRUSH são definidos dois níveis de controle, sendo um responsável pela geração dos comportamentos padronizados, necessários à locomoção, e o outro implementando reações que consideram os estímulos de contato da pata com o solo e o estado de flexão e extensão das pernas. Esta estratégia de controle tem referência nos sistemas biológicos dos quadrúpedes, e apresenta bom desempenho de adaptação a ambientes

desestruturados, ou seja, proporciona evolução de aplicação da robótica móvel a ambientes naturais.

### 2.2.2 Robôs “Titans” – Instituto de Tecnologia de Tokyo (Japão)

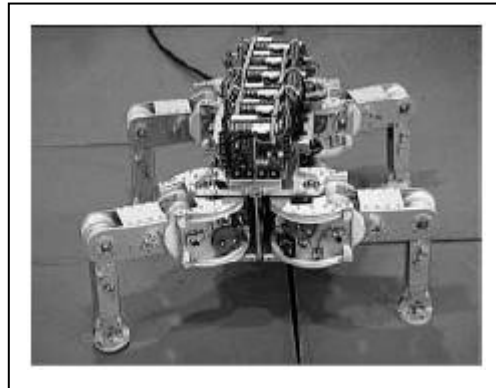


Figura 2.4 - Robô Titan VIII (Siegwart, 2004).

- Arquitetura de controle (Titan VIII): Pentium 200 MHz como computador de bordo, comunicação Ethernet com computadores de base, um acelerômetro de 3 eixos fixo à plataforma, e dois giroscópios. Está restrito a manter paralelos o plano definido pelas solas das patas e o plano da plataforma principal do corpo, disparando reações de correção de postura para inclinações superiores a 8 graus entre estes planos.

As arquiteturas de controle dos robôs Titans (III, IV, VI e VIII) se assemelham, e podem ser divididas em três níveis, a saber:

- nível 1: este é o nível hierárquico mais alto, o qual é responsável pelo planejamento global da navegação, com a definição genérica das tarefas a serem cumpridas (distância a percorrer, velocidade, direção, ou seja, traçado aproximado de uma trajetória);
- nível 2: este segundo nível é responsável por detalhar os movimentos a serem realizados para executar a tarefa definida no nível 1. Em função do tipo de ambiente de navegação (mapeado), define-se a transposição ou não de obstáculos, parâmetros dos passos, como extensão, altura de suspensão das patas, velocidade de acionamento das juntas, isto é, um detalhamento da cinemática e dinâmica dos movimentos a serem realizados;
- nível 3: este último nível controla a execução dos movimentos (posição e velocidade das juntas), e também reage às interações com o ambiente, gerando os movimentos denominados “reações de emergência”, como a parada imediata de todo o robô sempre que uma pata detecta (colide com) um obstáculo. Durante a realização da andadura os projetos TITAN IV e TITAN

VI realizam um balanço lateral como estratégia para estabilização de equilíbrio em busca do ZMP (*Zero Momentum Point*), sobre a diagonal de apoio da plataforma no plano de navegação.

- No projeto do robô TITAN VIII, adota-se no nível de controle de atitude (reação a desequilíbrio) uma mescla de duas estratégias denominadas “Compensação 3D do balanço da plataforma” e “Controle adaptativo de postura”. A primeira estratégia faz uso de balanço lateral, longitudinal, e movimento vertical da plataforma, em busca do ZMP. Já o controle adaptativo de postura utiliza quatro movimentos para estabilização do equilíbrio da plataforma, sempre que apenas duas pernas estabelecem o apoio do robô sobre o plano de navegação. Estes movimentos são: a rotação do corpo do robô em torno da linha diagonal das duas pernas de apoio sobre o plano de navegação, a translação do corpo do robô na direção perpendicular a linha diagonal definida entre as duas pernas de apoio, o balanço vertical e o balanço horizontal das pernas em voo durante a andadura (Kurazume, 2001).
- A composição de duas estratégias para obtenção da estabilidade de equilíbrio validadas no TITAN VIII se mostrou mais eficiente para a navegação em ambientes desestruturados e locomoção em níveis mais altos de velocidade (se comparados aos projetos anteriores).

A Figura 2.5 ilustra a estrutura genérica da arquitetura de controle dos robôs Titans.

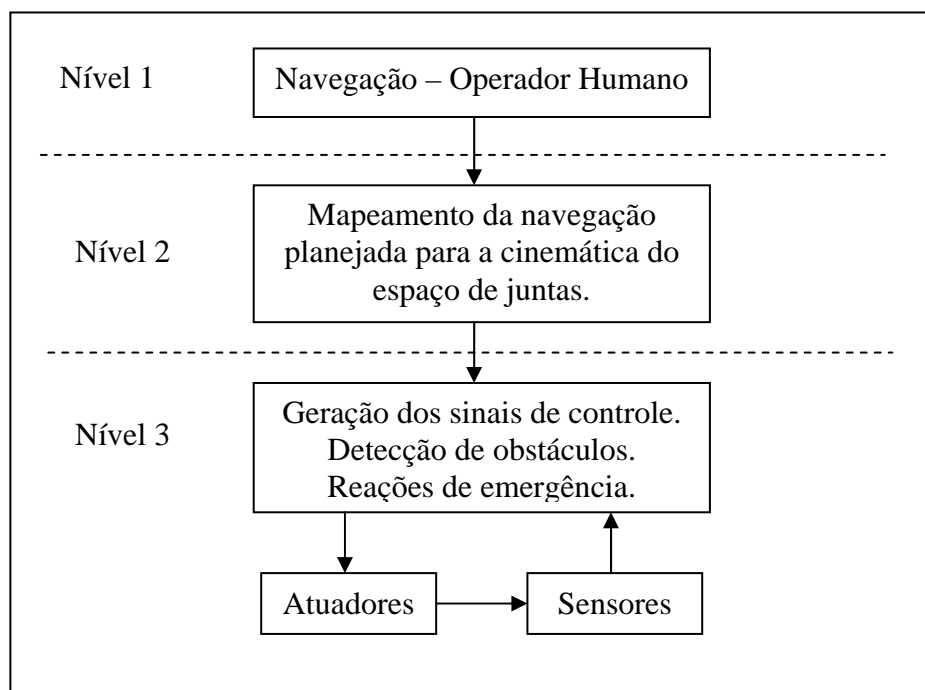


Figura 2.5 - Arquitetura de controle dos robôs TITANS (Ridderström, 2003).

Vale ressaltar que a andadura dos Titans é previamente definida por um processo de mapeamento do ambiente para geração de trajetória, o que confirma a caracterização de arquitetura hierárquica (deliberativa) (Hirose, 2000).

### 2.2.3 Robô “BISAM” (Biologically Inspired Walking Machine) (Inglaterra)



Figura 2.6 - Robô BISAM (Albiez, 2001).

- Estrutura eletro-mecânica: o corpo principal é composto por quatro *links* e 5 juntas rotacionais, sendo três que interconectam os quatro segmentos e duas que interligam o corpo principal às pernas. Assim, tornam-se possíveis os movimentos de curvatura, com flexão do corpo principal, assim como os movimentos executados por mamíferos quadrúpedes. Cada perna é composta por quatro *links* que se interligam por meio de três juntas rotacionais, sendo a perna vinculada ao corpo principal por mais uma junta rotacional, totalizando 21 juntas. O BISAM tem 70 cm de altura e 23 kg.
- Sensores: as 21 juntas são sensoriadas por *encoders*, e são utilizados quatro sensores tridimensionais de força, instalados um em cada pé, e um inclinômetro instalado no corpo principal.
- Arquitetura de controle: composta por dois PCs, sendo um de base fixa e o segundo embarcado, comunicando-se por uma *wireless LAN (Local Area Network)*. É utilizado como sistema operacional o Linux, com um *kernel* de tempo-real. O PC embarcado comunica-se com microcontroladores SIEMENS C-167, responsáveis pelo controle das pernas, por meio de uma rede CAN. O diagrama do *hardware* utilizado para controle do BISAM está ilustrada na Figura 2.7.



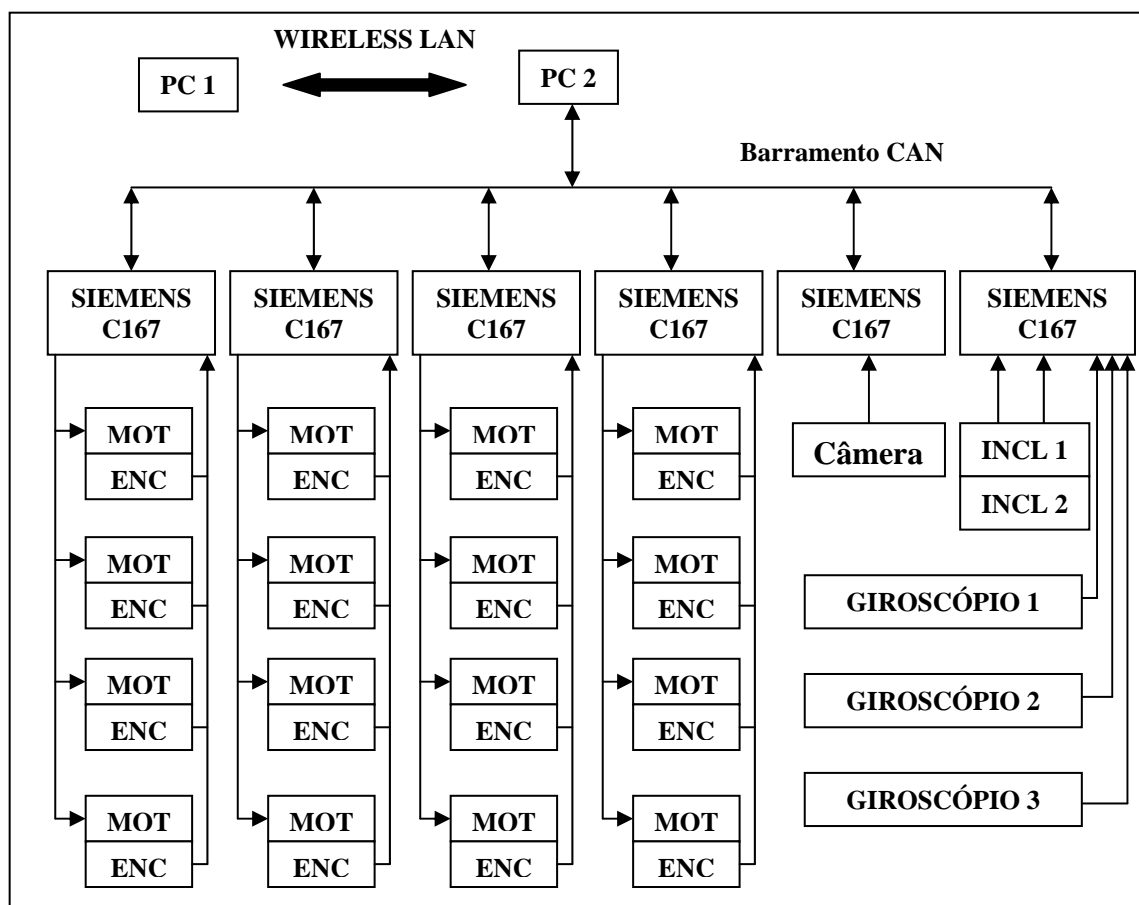


Figura 2.7 - Arquitetura de controle do BISAM (Albiez, 2001).

- Estratégia de controle: é utilizado o controle por reflexo à distribuição de forças sobre os pés, inclinação do corpo principal e altura do corpo principal (definida pela média da altura de cada perna). Os processos que definem os reflexos foram implementados com lógica fuzzy e aprendizado adaptativo de reflexos com uso de redes neurais, sendo utilizado um esquema de distribuição de pesos a cada reflexo para solucionar os conflitos de ativação de reflexos distintos (Berns, 1999).

A estratégia de controle utilizada no BISAM não se restringe à busca pelo ZMP (*Zero Momentum Point*), pois as patas do BISAM são de pequenas dimensões, o que define uma área restrita (aproximadamente uma linha) na diagonal de apoio das patas sobre o solo, dificultando a busca do ponto de momento zero (estado de equilíbrio).

Para o controle da estabilidade de equilíbrio, é utilizada uma solução composta de reflexos gerados por lógica nebulosa para correção de postura na transposição de pequenos obstáculos em movimentos estaticamente estáveis. Também é utilizado o aprendizado adaptativo, com uso de uma rede neural RBF (*Radial Basis Function*), para a correção da trajetória do CG (Centro de Gravidade) empregado na realização de trote. A malha de controle utilizada no BISAM está ilustrada na Figura 2.8.

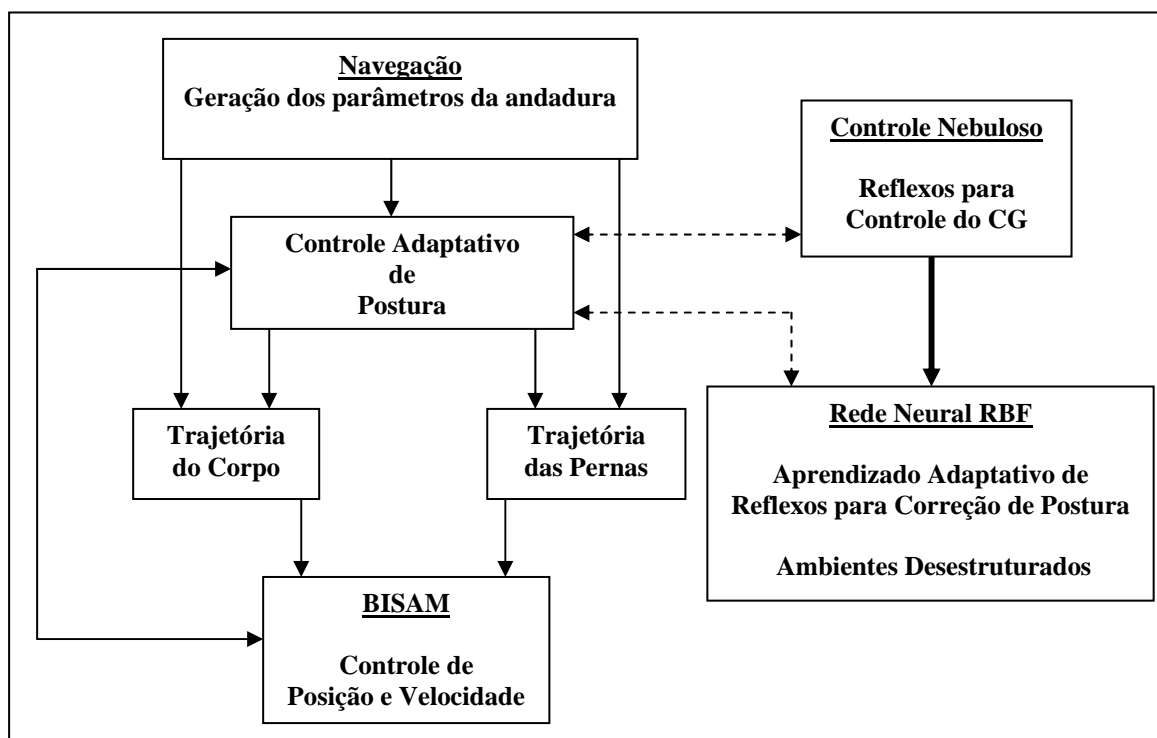


Figura 2.8 - Malha de Controle do BISAM (Albiez, 2001).

Os reflexos gerados por controladores nebulosos para correção de postura são:

- a) EquilibrarForçaXY. Este reflexo busca igualar as forças exercidas pelas patas sobre a superfície de navegação. As saídas deste reflexo são movimentos no plano XY de deslocamento do CG do robô;
- b) EquilibrarForçaZ. Este reflexo também busca igualar as forças sobre as patas; entretanto, executa esta função mudando a altura das pernas;
- c) AlturaCorpo. Este reflexo mantém a altura do corpo do robô controlando a coordenada z da posição de apoio das patas do robô;
- d) InclinaçãoCorpo. Este reflexo faz uso dos sinais obtidos de inclinômetros instalados no corpo do robô para mantê-lo paralelo ao plano de navegação;
- e) AliviarPerna. Com este reflexo a perna que iniciará vôo na execução de um passo é aliviada de sua carga prévia através de um deslocamento do corpo no plano XY do corpo do robô.

No aprendizado adaptativo de reflexos, a rede neural utilizada observa o estado atual do robô, e gera reações de equilíbrio. Estas reações são integradas às referências de posição, velocidade e torque das juntas, obtidas a partir de uma função de distribuição normal cuja variância é determinada por um parâmetro de desempenho da correção de postura (mensuração da divergência entre postura desejada e postura real).

Em função do aprendizado de reações de equilíbrio obtido pela rede e da análise de desempenho da recuperação de postura, faz-se a adaptação da geração de andadura. Esta adaptação torna-se possível em tempo de execução, pois uma característica das redes RBF é a divisão do universo de aprendizado em subconjuntos (classes de instabilidade de equilíbrio), o que viabiliza a rapidez no aprendizado de reações às instabilidades de equilíbrio.

A arquitetura, e a estratégia de controle, adotada no BISAM enquadram-se na linha de pesquisa do uso restrito de sensores internos para controle da estabilidade de equilíbrio de robôs quadrúpedes.

## 2.3 COMPARAÇÃO DAS ARQUITETURAS DE CONTROLE

Para facilitar a avaliação comparativa das arquiteturas pesquisadas, a Tabela 2.1 apresenta o resumo das características de cada arquitetura. A partir desta avaliação, torna-se possível evidenciar as influências destes projetos sobre a arquitetura proposta nesta tese, como também destacar as contribuições da arquitetura proposta. É importante ressaltar que os robôs apresentados estão em contínua evolução, e foram escolhidos em função da semelhança construtiva com o projeto desenvolvido nesta tese.

Tabela 2.1 – Características de controle do robôs abordados.

Robôs	Paradigma de controle	Estratégia de controle
<b>Patrush II</b>	Híbrido	Uso do gerador central de padrões de andadura e reflexos de equilíbrio por meio de redes neurais.
<b>Titans</b>	Hierárquico	Balanço de corpo e pernas em busca do ZMP.
<b>BISAM</b>	Híbrido	Reflexos com controle nebuloso e aprendizado adaptativo de postura com uso de rede neural artificial.

A Tabela 2.1 evidencia que nos projetos de robôs quadrúpedes abordados predomina o uso do paradigma de controle hierárquico e híbrido. Esta predominância se deve à complexidade de controle destes robôs (muitos graus de liberdade, sincronismo das pernas para manutenção do equilíbrio, complexa modelagem cinemática e dinâmica, custo computacional), o que se reflete na necessidade de implementação de distintos níveis de controle para viabilizar a realização de tarefas.

Quanto às estratégias de controle, observa-se o uso freqüente de técnicas de controle inteligente (lógica nebulosa e redes neurais), na implementação de comportamentos reflexivos. O uso da lógica nebulosa proporciona a redução de custo computacional, pela não necessidade de processamento de modelos matemáticos não lineares (mapeamento entre espaço cartesiano e espaço de juntas). Já o uso de redes neurais viabiliza a classificação de obstáculos, posturas, e outras informações que podem ser processadas por um módulo gerador de comportamentos reflexivos, utilizados para garantir estabilidade de equilíbrio, correção de trajetórias, recuperação de posturas e outras aplicações.

Nesta linha de pesquisa a meta é melhorar a adaptação dos robôs a ambientes desestruturados, tornando-os capazes de navegar em ambientes abertos (na natureza) e interagir com os habitantes destes ambientes (outros robôs, animais ou seres humanos). Uma estratégia fortemente utilizada para que esta meta seja alcançada é o uso de geradores centralizados de padrões comportamentais (CPG - *Central Pattern Generator*), integrado à geração de reflexos de equilíbrio que corrigem instabilidades geradas por distúrbios externos ou movimentos críticos da andadura.

## 2.4 A CONTRIBUIÇÃO DA ARQUITETURA DE CONTROLE DO GUARÁ

A arquitetura de controle proposta para o Guará se enquadra no grupo dos robôs com controle hierárquico, dividido em camadas com distintas atribuições de controle, apresentando comportamentos reflexivos gerados a partir de informações obtidas de sensores internos e processamento por lógica nebulosa.

O uso do paradigma hierárquico de controle no Guará permitiu a redução da complexidade e custo computacional para implementação dos níveis coordenador e atuador de controle. É importante ressaltar que para um robô quadrúpede sempre existirá a possibilidade de queda na realização de uma manobra, e a sincronização dos movimentos das pernas de modo a garantir o equilíbrio do robô exige o emprego de um nível de controle supervisor. Esta topologia da arquitetura de controle deve-se ao fato de que as pernas não possuem nenhuma memória com a descrição completa do estado das demais (ângulos de junta, estado das chaves de colisão, presença ou não de movimento).

Apesar dos benefícios trazidos pela distribuição do controle no nível supervisor (redução do risco de falha geral com a flexibilidade de redistribuição de tarefas), a proposta da arquitetura de controle do Guará concentra este nível de controle em apenas uma unidade processadora (*notebook*). Esta concentração viabiliza a implementação de uma arquitetura de controle totalmente embarcada, o que, conseqüentemente, contribui para aumentar o grau de autonomia do robô.

A implementação da arquitetura de controle do Guará, no padrão já validado em diversos outros projetos para controle de robôs quadrúpedes, permite a comprovação do grau de eficiência desta topologia (hierárquica com três camadas) e o aprendizado quanto aos requisitos e procedimentos necessários para a realização experimental da mesma. Entretanto, vale ressaltar que a arquitetura proposta traz uma abordagem diferenciada de solução para o problema de controle da estabilidade de equilíbrio, na qual o sensoriamento utilizado não é processado para modelar o estado de instabilidade (posturas, movimentos) e então definir reações.

Para melhor justificar a contribuição obtida a partir da solução proposta para o controle de estabilidade de equilíbrio do Guará, é importante que sejam evidenciadas as características principais das propostas contidas nos projetos apresentados na seção 2.3 deste capítulo, ou seja:

- a) Geração de padrões de andadura e reflexos por redes neurais - PATRUSH;
- b) Mescla de correção do posicionamento do CG com o mapeamento do ambiente navegado para geração de padrões de movimentos – TITAN VIII;

- c) Uso de redes neurais para correção da trajetória do CG, e aplicação da lógica nebulosa a partir da resposta de força sobre as patas e da coordenada z de apoio das patas sobre a superfície de navegação – BISAM;

Pode-se observar que as soluções propostas estão vinculadas a uma descrição analítica do estado de desequilíbrio, seja por medição da distribuição de forças sobre as pernas, ou controle cinemático (velocidade e aceleração) ou definição de coordenadas geométricas do estado das pernas, e subsequente aplicação de modelos matemáticos. Também são utilizadas redes neurais artificiais para geração de padrões de comportamentos que garantam a estabilidade de locomoção e integração com a modelagem do ambiente explorado.

Estes métodos para definição de reflexos estão validados, mas impõem sobre o controle do robô um custo computacional superior à solução que faz uso de informações das tendências de desequilíbrio, para a correção de postura do robô.

No Guará a tendência de desequilíbrio é obtida a partir da observação do acelerômetro de dois eixos, do qual se obtém tanto a informação de inclinação da plataforma quanto a informação de aceleração por força motriz de locomoção ou esforços externos aplicados ao robô. Neste trabalho, são considerados indícios de desequilíbrio inclinações e acelerações medidas que extrapolem os valores obtidos a partir da locomoção estável do robô, seja em trajetórias retilíneas ou curvilíneas.

Vale também destacar que a informação obtida do acelerômetro é integrada com o estado de apoio da plataforma sobre a superfície de navegação, e desta integração (apenas com uso de sensoramento interno) conclui-se o estado de equilíbrio do robô.

Algumas vantagens da aplicação da solução proposta para o Guará, que é livre da caracterização analítica para correção de instabilidades de equilíbrio, são citadas a seguir:

- a redução do custo computacional (*software* e *hardware*) para a geração dos reflexos;
- a possibilidade de processamento da geração de reflexos pelas camadas inferiores de controle da arquitetura, em função da redução no custo computacional, com conseqüente liberação de carga de processamento sobre o nível supervisor de controle;
- ganho na velocidade de geração dos reflexos às instabilidades de equilíbrio;
- não exigência de modelo do mundo para obtenção de comportamentos reflexivos, o que contribui para a locomoção em ambientes desestruturados;
- a garantia de reação a instabilidades sem a exigência de exatidão dos valores obtidos pelo sensoramento, sendo suficiente observar as tendências de variação dos mesmos;
- a redução de variáveis observadas para definição da instabilidade.

Com base na comparação das características apresentadas para as soluções de controle da instabilidade de equilíbrio, conclui-se que a proposta apresentada para o Guará contribui para proporcionar ao robô a capacidade de locomoção e reação com reduzido custo de implementação. Esta proposta, integrada aos algoritmos para transposição de obstáculos (Bento, 2007) e ao sistema de visão computacional (Orlandi, 2007), define para o robô recursos necessários à exploração de ambientes com preservação de sua integridade física e possibilidade de realização de tarefas específicas.

A partir da discussão apresentada neste capítulo a respeito de arquiteturas e estratégias de controle para robôs móveis quadrúpedes, tem-se uma base de referências para a apresentação da arquitetura de controle proposta para o Guará.

## 3 A ARQUITETURA DE CONTROLE PROPOSTA

### 3.1 OBJETIVOS

A arquitetura proposta está moldada ao paradigma de controle hierárquico, sendo sua estrutura definida para atender às seguintes condições:

- garantir o equilíbrio do robô durante sua locomoção impõe a necessidade de observação contínua do estado atual real de toda a estrutura, para que se decida a manutenção ou mudança do padrão dos movimentos subsequentes. Neste nível de controle estão presentes os processos de supervisão, modelagem e planejamento;
- a interação do robô com o ambiente de navegação exige da arquitetura a capacidade de reação a qualquer restrição de movimentos que possa dar origem ao desequilíbrio, desvio de trajetória ou dano físico. Este nível de controle faz uso de sensores de toque nas patas (micro-chaves) e de um acelerômetro, com o qual se define o grau de inclinação de rolagem e mergulho (importante para a definição do equilíbrio). Das informações obtidas a partir destes sensores são processadas rotinas de reação primária (parada imediata da perna colidida) nos processadores atuadores, e rotinas de reação secundária, para sincronismo de parada de todas as pernas, busca imediata da condição de estabilidade e envio à supervisão do estado de colisão (nos processadores do nível coordenador).

A execução de comportamentos reflexivos contribui para o ganho na velocidade de resposta a condições de desequilíbrio indesejáveis. Estes comportamentos estabelecem as ações imediatas para a correção de postura do Guará, objetivando a manutenção de equilíbrio, sendo ainda possível a implementação de outros processos para controle da estabilidade de equilíbrio em camadas hierarquicamente superiores.

Com base nesta concepção para a arquitetura de controle proposta, já se encontra em desenvolvimento em um projeto de tese paralelo a implementação de um sistema de visão laser, que tornará possível a classificação de objetos presentes no ambiente de navegação. A integração dos comportamentos reflexivos com a visão computacional favorece aos estudos de navegação do Guará em ambientes desestruturados, o que contribui para a melhoria do grau de autonomia do robô.

A Figura 3.1 ilustra em um diagrama de blocos os níveis de controle implementados, bem como a inter-relação entre estes.

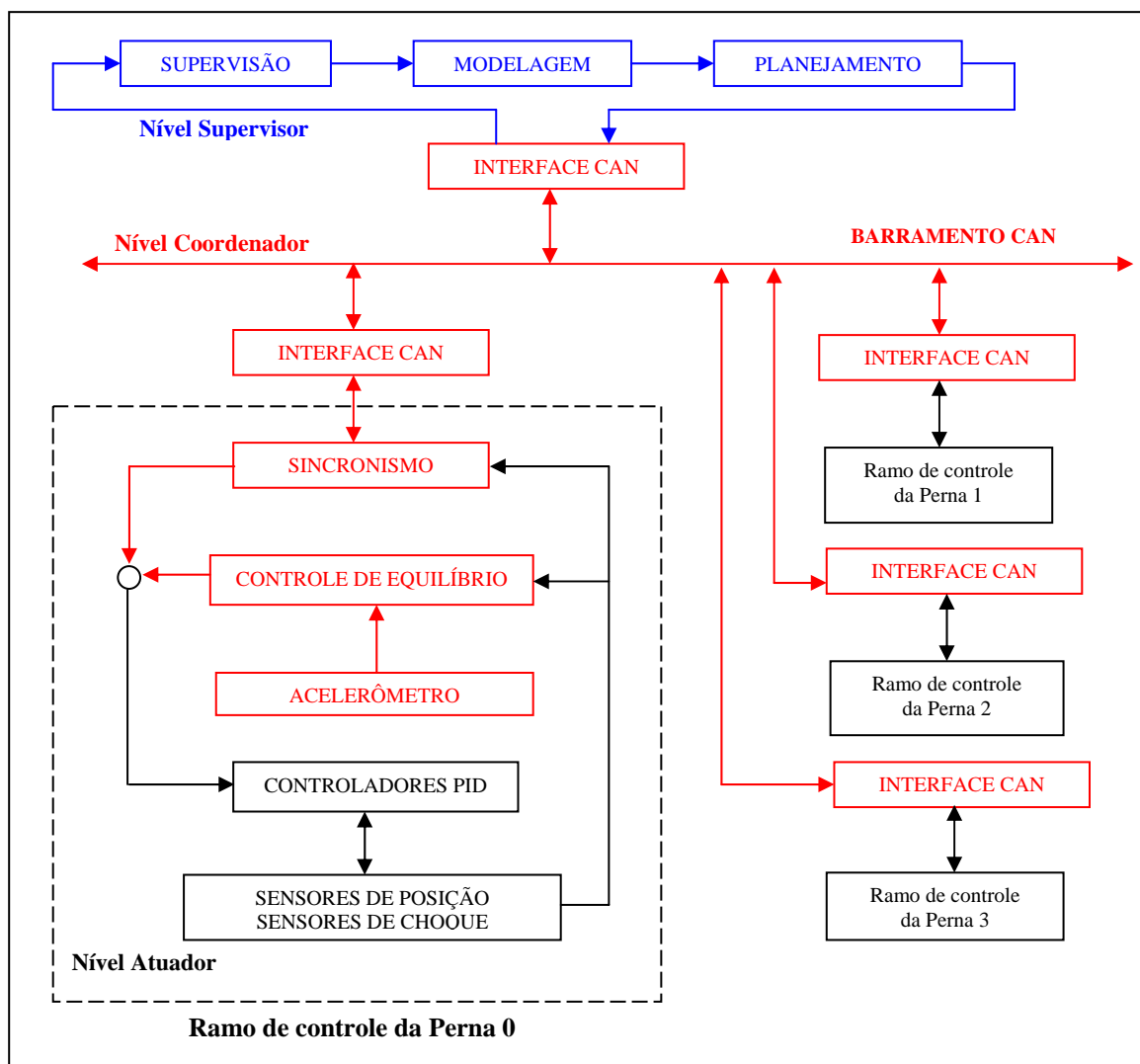


Figura 3.1 – Visão geral da arquitetura de controle do Guará.

## 3.2 ARQUITETURA DE CONTROLE

O *hardware* utilizado para implementar a arquitetura de controle proposta conjuga a adequação às funções atribuídas a cada nível de controle com a minimização de custo (uso de microcontroladores e aproveitamento máximo dos recursos disponíveis). A Tabela 3.1 apresenta a funcionalidade dos níveis hierárquicos de controle da arquitetura proposta.



Tabela 3.1 - Funcionalidade dos níveis de controle.

<b>Nível de Controle</b>	<b>Funcionalidade</b>
<b>Supervisão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observação do estado atual do robô durante a realização de uma tarefa;</li> <li>• Planejamento para definição dos estados subsequentes na realização das tarefas;</li> <li>• Processamento do modelo cinemático para geração das novas referências de andadura do robô.</li> </ul>
<b>Coordenação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distribuição sincronizada de referências para execução da andadura, e processamento dos comportamentos reflexivos para manutenção da estabilidade de equilíbrio.</li> </ul>
<b>Atuação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Execução dos algoritmos PID para controle de posição das juntas das pernas;</li> <li>• Detecção de choque das patas com obstáculos no ambiente de navegação, com imediata reação de parada.</li> </ul>

### 3.2.1 Nível Supervisor de Controle

Neste nível de controle faz-se a observação do estado atual real do robô (leitura de todas as posições atuais dos 16 graus de liberdade), a partir do qual gera-se as referências para a continuidade dos movimentos, por processamento do modelo cinemático do Guará.

Para a supervisão do robô foi construída uma ferramenta de interface com o usuário (Bento, 2007), que permite as seguintes ações: a visualização de uma animação gráfica dos movimentos do Guará, a configuração de todos os controladores PID utilizados para cada grau de liberdade, a visualização em tempo de execução do estado das chaves de contato fixas nas patas do robô, a mudança em tempo de execução da velocidade de locomoção, e a definição de um raio de curvatura para movimentos curvilíneos. Desta ferramenta também podem ser obtidos arquivos do tipo texto com os valores reais das posições de junta

assumidas, ao longo de uma trajetória, e os valores definidos pelo acelerômetro fixo à plataforma do robô, sendo estes dados importantes para a análise qualitativa de desempenho.

Conclui-se que o nível supervisor de controle do Guará cumpre três funções relevantes que são a configuração da arquitetura de controle para execução das tarefas propostas, a geração das referências para a realização da locomoção, e a observação dos estados correntes para a tomada de decisão quanto à continuidade de locomoção ou quanto a uma recuperação de postura. Vale ainda ressaltar a interface estabelecida entre este nível de controle e o nível coordenador, o que permite a conversão dos movimentos planejados em ações nos níveis inferiores de controle (coordenador e atuador).

### 3.2.2 Nível Coordenador de Controle

O processamento de dados no nível coordenador de controle pode ser definido a partir da interface de comunicação CAN (*Control Area Network*), que permite a transmissão dos dados gerados no nível supervisor de controle a serem enviados ao nível atuador (ganhos dos controladores PID, parâmetros de temporização dos controladores PID, posições de referência para os atuadores da perna), bem como viabiliza a recepção de dados oriundos nos níveis atuador e coordenador, enviados ao nível supervisor.

Através da interface de comunicação CAN obtém-se também o sincronismo de movimentação das pernas na realização da andadura, pelo uso do *broadcast* na transmissão de mensagens. O protocolo CAN executa um robusto tratamento de erros de comunicação, o que contribui para a confiabilidade de desempenho da arquitetura de controle.

Além de estabelecer uma interface de comunicação entre os níveis supervisor e atuador de controle, no nível coordenador está implementado o sensoriamento de instabilidade de equilíbrio e os algoritmos nebulosos de controle (um para cada perna) com bases de regras sincronizadas para geração dos reflexos de estabilidade. A função de gerar os reflexos de estabilidade é a principal contribuição da arquitetura proposta à solução do problema investigado (manutenção da estabilidade de equilíbrio), tendo-se que ressaltar a autonomia do nível coordenador de controle na retomada do equilíbrio sem a dependência do nível supervisor.

O canal de comunicação entre o nível coordenador e o nível atuador de controle são portas paralelas escravas.

Definidas as funções atribuídas ao nível coordenador de controle torna-se possível a análise das funções inerentes ao nível atuador de controle.

### 3.2.3 Nível Atuador de Controle

O nível atuador de controle é responsável por gerar os sinais necessários para o acionamento das quatro juntas da perna (a partir das referências recebidas do nível coordenador), bem como monitorar a realimentação de posição das juntas, fechando a malha de controle dos atuadores, e ainda detectar a ocorrência de choque da pata com obstáculos durante a locomoção. Também no nível atuador de controle é executado o mais básico reflexo do Guará, que consiste em parada imediata dos movimentos das pernas na detecção de colisão.

O *hardware* adotado para os níveis de controle supervisor, coordenador e atuador foi definido de acordo com os seguintes critérios: isolar o processamento de controle de movimento das pernas e detecção de colisão, do controle de geração de trajetórias e

distribuição do fluxo de informações. Assim, torna-se possível a expansão de tarefas tanto para o nível supervisor quanto para o nível coordenador de controle o que contribui para aumentar o grau de autonomia do robô.

A descrição do *hardware* utilizado na arquitetura de controle do Guará encontra-se no Capítulo 5 desta tese.

É importante ressaltar que o *hardware* utilizado na arquitetura proposta não é necessariamente a única opção, e não há intenção de que, sobre esta opção, seja concentrada a relevância da proposta. O foco principal é a estratégia de uso de sensores não-visuais, internos, na geração de comportamentos reflexivos para controle da estabilidade de equilíbrio, em uma arquitetura de controle hierárquico.

Esta estratégia foi adotada, pois em um robô quadrúpede é necessário o conhecimento do estado completo das quatro pernas (ângulos de junta, condição de movimento, e apoio sobre o solo), para que de forma coordenada seja feita a correção de postura. Esta correção exige o processamento do modelo cinemático do robô e a análise da margem de estabilidade, razão pela qual, torna-se necessária nesta etapa da retomada de postura, a intervenção do nível supervisor de controle.

A coordenação das pernas com garantia de estabilidade equilíbrio do robô, impõe restrições à aplicação do controle puramente reativo, o que diferencia esta estratégia de controle de estratégias aplicáveis a robôs a rodas, pois, estes a priori não desenvolvem movimentos que proporcionam queda.

O projeto dos controladores nebulosos e a descrição do experimento realizado para validação dos comportamentos reflexivos estão detalhados nos Capítulos 4 e 5.

### 3.3 SOFTWARE DA ARQUITETURA DE CONTROLE

Cada um dos níveis de controle descrito no item 3.2 desempenha funções essenciais à locomoção do robô, implementadas pelo *software* de controle sobre o hardware descrito.

O *software* de controle tem como objetivo garantir um encadeamento de ações capazes de manter o equilíbrio do robô na realização das trajetórias, além de detectar e transpor obstáculos. Para que isto seja possível, é necessário que se estabeleça entre os elementos processadores um sincronismo eficaz, desde a geração das posições de referência para cada junta das pernas, na execução de qualquer movimento, até a interação do robô com o ambiente de navegação e o retorno do estado atual ao nível de supervisão e planejamento.

#### 3.3.1 O *software* de supervisão

O *software* de supervisão interage com o robô durante todo o tempo de locomoção, e nesta interação realiza a observação do estado atual do robô para gerar as referências de execução dos passos da andadura.

Para realizar a supervisão, o *software* implementado neste nível de controle está estruturado com as seguintes funções:

- a configuração de todos os parâmetros da arquitetura (identificadores e prioridades das mensagens CAN, parâmetros de temporização da comunicação CAN, ganhos do controladores PID, parâmetros de temporização dos algoritmos de controle PID, e valores limites das funções de pertinência do controlador nebuloso);
- o processamento dos modelos cinemáticos direto e inverso, para definição das referências de execução dos passos da andadura;
- a supervisão dos estados assumidos pelo robô durante sua locomoção, sendo estes estados definidos pela observação da posição de cada uma das 16 juntas, e ocorrência ou não de colisões e contatos das patas com a superfície de navegação ou obstáculos, e o estado de equilíbrio;
- a execução dos algoritmos para transposição de obstáculos.

A Figura 3.2 ilustra a estrutura utilizada para a troca de informações entre o nível de coordenação do controle e os processos de supervisão, modelagem e planejamento.

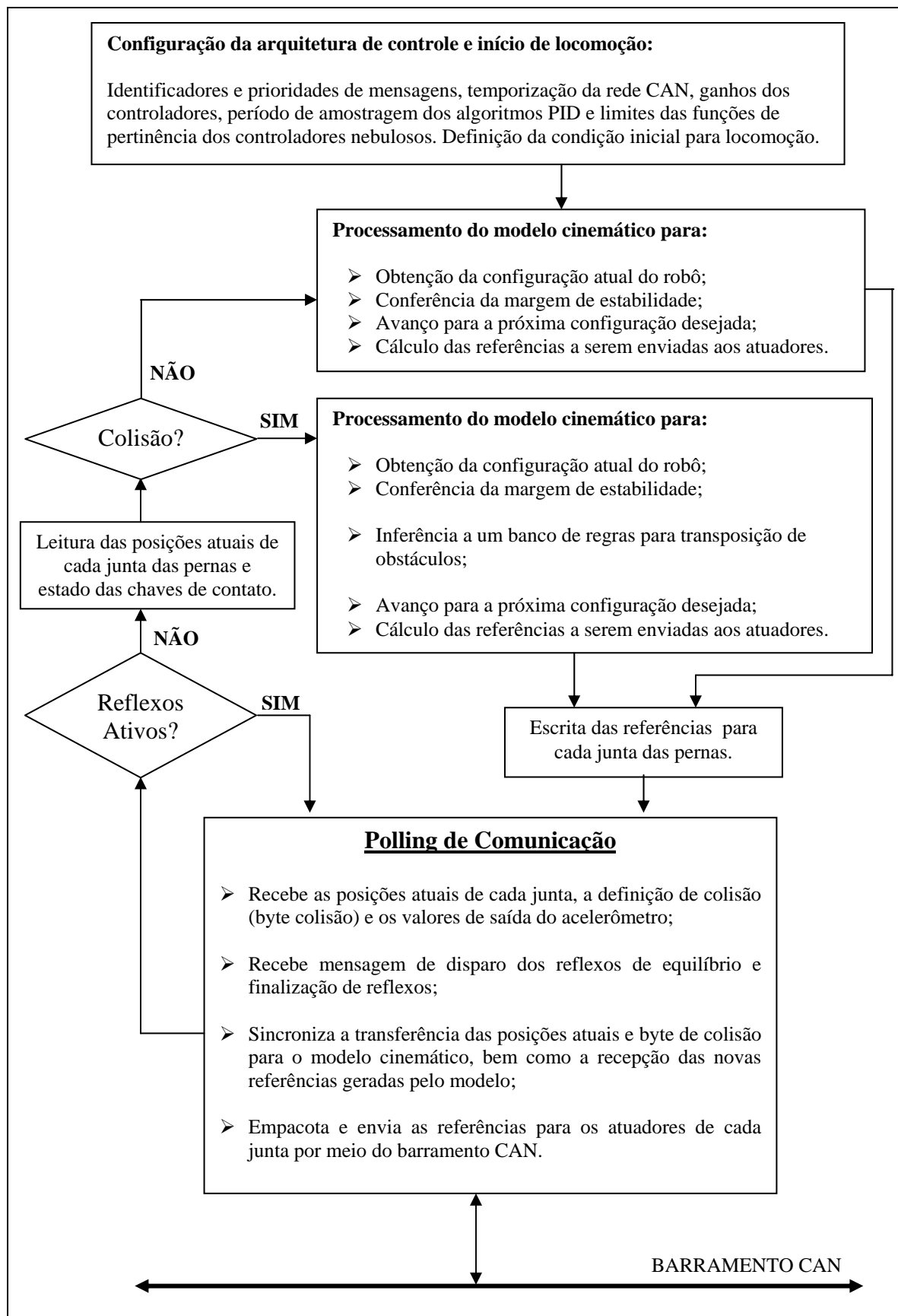


Figura 3.2 – Estrutura do software do nível supervisor de controle do Guar.

O uso do *polling* de comunicação, conforme ilustra a Figura 3.2, define a interface de acesso do processamento no nível supervisor ao barramento CAN, tanto na recepção como na transmissão de dados. O *polling* verifica se na interface CAN existem dados a serem coletados ou transfere para esta interface as posições de referência recebidas do modelo cinemático. Uma vez recebidos dados do barramento CAN, a primeira ação conseguinte é a verificação de ativação ou não de reflexos para estabilidade de equilíbrio, pois em caso afirmativo a geração de novas referências a partir do nível supervisor é interrompida até que seja recebida neste nível a mensagem de finalização de reação.

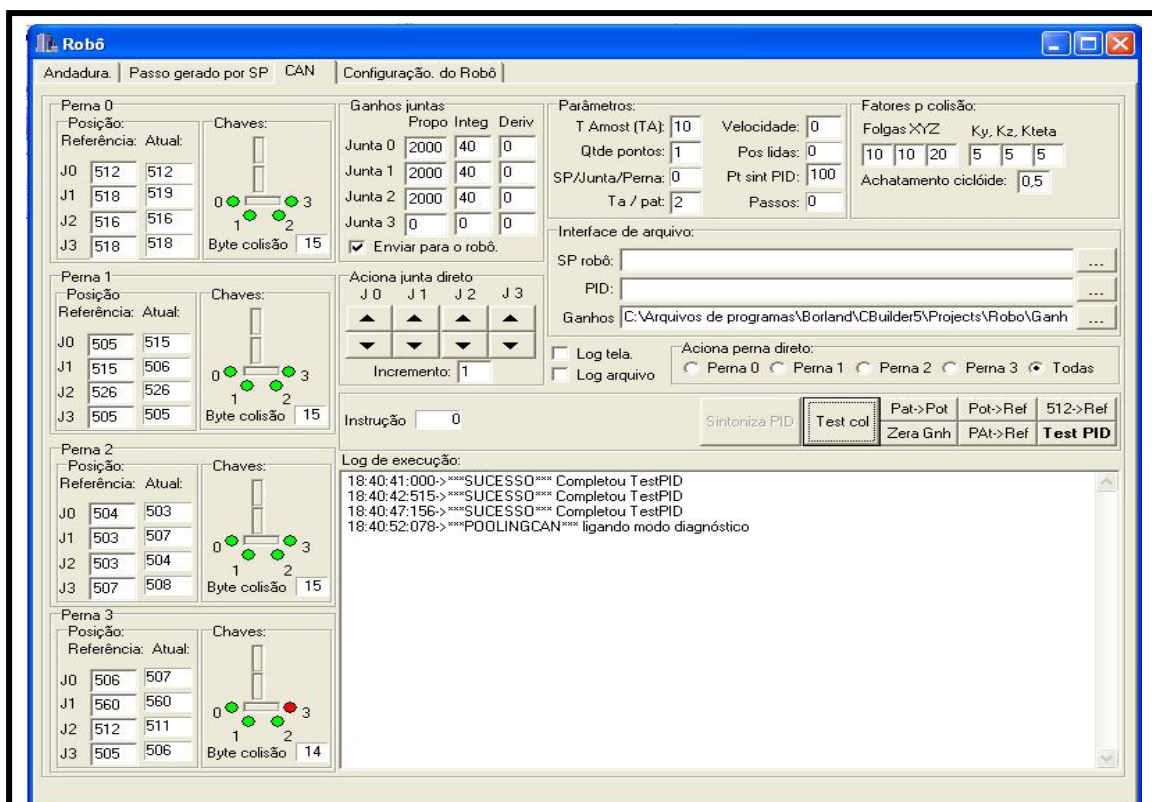
Enquanto não são ativados os reflexos para manutenção de equilíbrio, verifica-se a condição de detecção ou não de obstáculos. Havendo obstáculos, com base na definição do estado atual do robô, será feita uma inferência a uma base de regras para transposição de obstáculos, da qual são gerados os movimentos subseqüentes (cálculo das posições de referência de cada junta a serem enviadas para os atuadores). Caso não haja colisão com obstáculos, confere-se a margem de estabilidade da plataforma para que se possa definir o próximo estado desejado para o robô e, conseqüentemente, as posições de referência futuras para cada junta das pernas.

Todas as informações que transitam pelo barramento CAN processadas pelo *polling* de comunicação são formatadas de acordo com o protocolo CAN 2.0 (Lawrenz, 1997), sendo necessária, na execução do *polling*, a verificação de chegada de nova mensagem, leitura da mensagem recebida e liberação do *buffer* de recepção para que não haja sobreposição de informações. Na transmissão, define-se o objeto de mensagem a ser utilizado, o identificador da mensagem e o instante de transmissão.

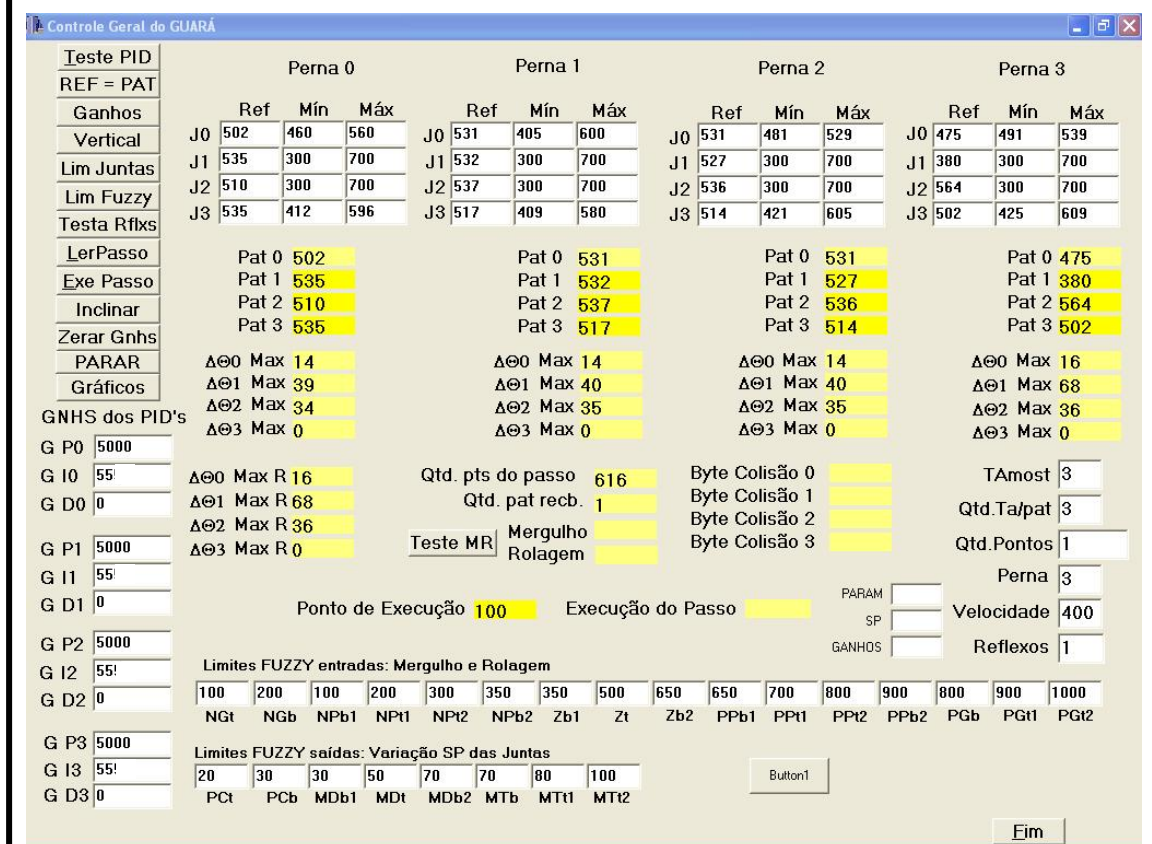
A Figura 3.3 (a) ilustra a interface de configuração utilizada nos testes de locomoção do Guará.

Em (Bento, 2007) é detalhada a construção dos modelos cinemáticos utilizados para geração das referências dos movimentos do Guará (movimentos para trajetória retilínea e curvilínea, e escalada de obstáculos retangulares), e também é abordada a construção dos algoritmos para transposição de obstáculos.

Na Figura 3.3 (b) é apresentada uma interface desenvolvida para realização dos testes de sintonia dos controladores nebulosos, de modo a permitir um aprimoramento do processamento dos reflexos previamente à interconexão definitiva com o sistema de supervisão desenvolvido em (Bento, 2007).



(a)



(b)

Figura 3.3 – (a) Interface do nível supervisor de controle (Bento, 2007); (b) Interface de teste para sintonia dos controladores PID e nebulosos.

### 3.3.2 O *software* do nível coordenador

Antes de tratarmos do nível coordenador de controle, é importante ressaltar que entre este nível e o nível supervisor é utilizado para a comunicação o barramento CAN. Este padrão de comunicação desempenha o importante papel de garantir a integridade das informações que trafegam entres estes dois níveis de controle, resolver a colisão de dados, permitir alta velocidade de comunicação e, com o uso do *broadcast*, viabilizar o sincronismo de movimentação das pernas. A caracterização da comunicação com protocolo CAN está detalhada no Capítulo 5 desta tese.

Aqui o foco é a descrição da lógica implementada para receber do nível supervisor de controle as posições de referência para cada junta das pernas, calculadas no modelo cinemático, distribuí-las de forma sincronizada para os processadores de controle das juntas, recebendo destes, a cada posição de referência, as posições atuais de cada junta e a informação de ocorrência ou não de colisão. Estes processos podem ser visualizados conforme os fluxogramas das Figuras 3.4 e 3.5.



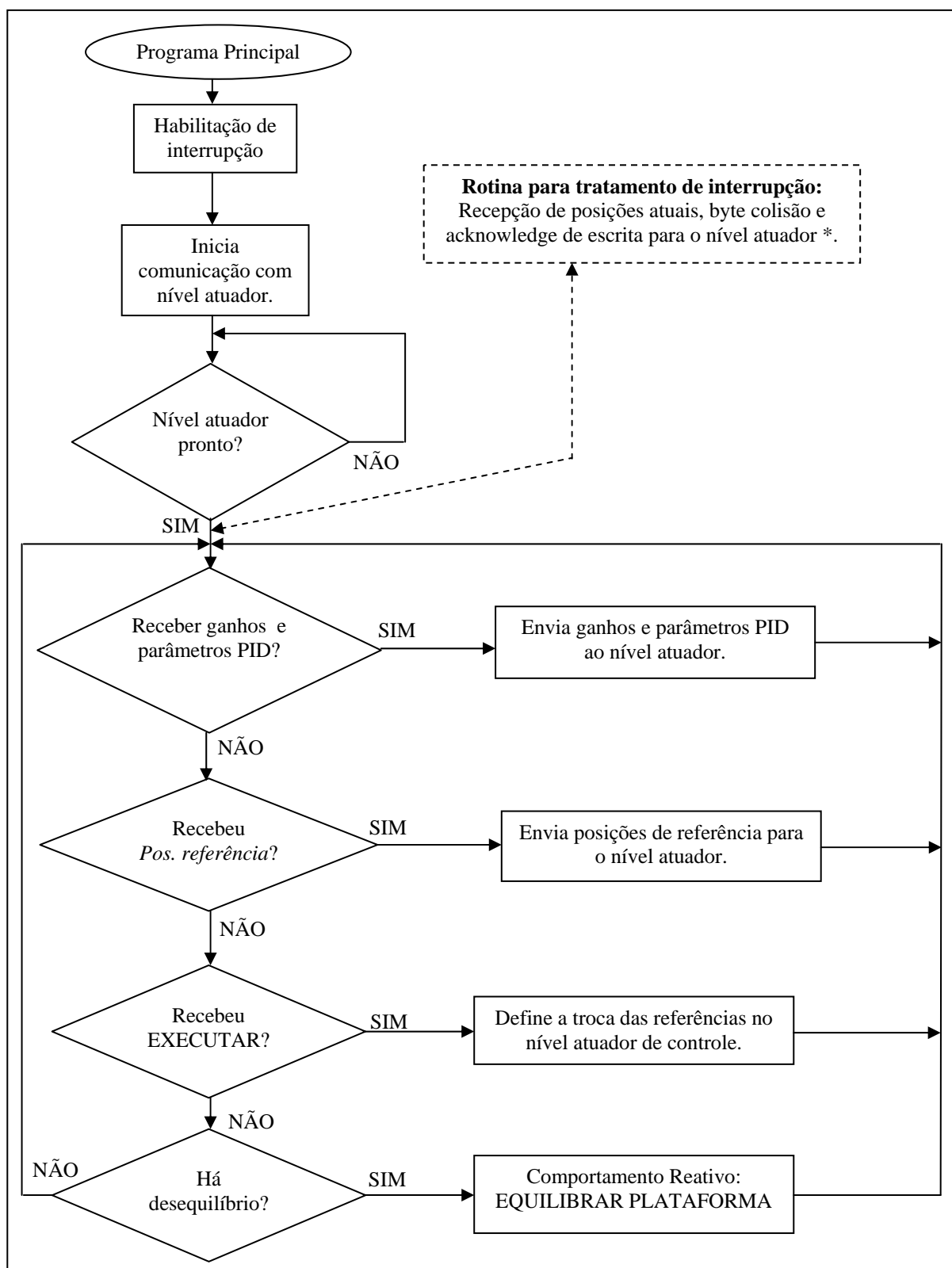


Figura 3.4 - Fluxograma do corpo principal do nível coordenador de controle.

\* O fluxograma da rotina de interrupção está ilustrado na Figura 3.5.

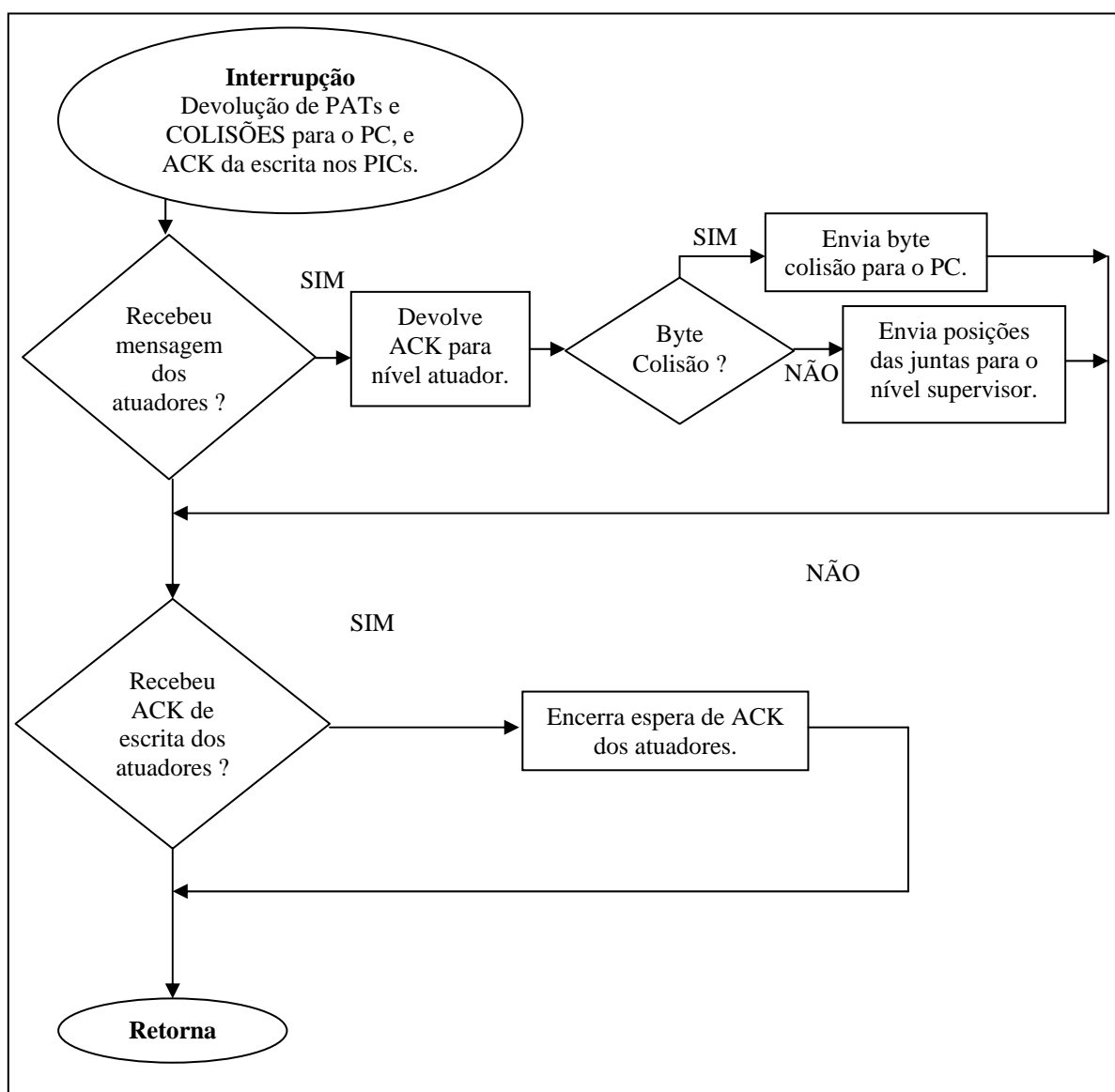


Figura 3.5 - Fluxograma da rotina de devolução de posições atuais e byte colisão.

Conforme ilustra a Figura 3.4, no corpo principal do programa de controle do nível coordenador as tarefas executadas são: receber as informações oriundas do nível supervisor (ganhos, parâmetros para execução dos algoritmos PID, posições de referência das juntas) e transmiti-las ao nível atuador de controle, receber o comando de execução da posição de referência e definir para o nível atuador a troca sincronizada de posições de referência, e receber do nível atuador de controle as posições atuais das juntas e o estado de colisão da pata com o ambiente de navegação (byte colisão), transmitindo estas informações ao nível supervisor de controle.

Além da distribuição dos parâmetros do controlador PID, das posições de referência, e da realimentação de posição e *byte* colisão, no nível coordenador de controle também é realizada a leitura dos sinais de inclinação, de mergulho e rolagem obtidos do acelerômetro e, a partir desta leitura pode então ser disparado o comportamento “Equilibrar Plataforma”. A implementação deste comportamento visa assegurar estabilidade suficiente à plataforma para a realização das tarefas, e é tratada no Capítulo 4.

De acordo com a Figura 3.5, o nível coordenador recebe a informação de detecção de um obstáculo através da recepção do byte colisão, sendo responsável por reagir a esta detecção propagando esta informação a todas as pernas e também ao nível supervisor de controle. Este é o segundo nível do tratamento da detecção de obstáculos, uma vez que os próprios PICs que controlam a atuação das juntas param imediatamente os movimentos destas na percepção de colisão ou ausência de apoio sobre o plano de navegação (saliências ou depressões).

Para completar a apresentação e análise da arquitetura de controle, descreve-se a seguir o nível de controle atuador, os processos nele executados e a interação deste com os níveis de controle coordenador e supervisor.

### 3.3.3 O *software* do nível atuador

Neste nível são realizados os seguintes processos:

- recepção de ganhos do PID e parâmetros do PID ( $T_a$ ,  $Q T_a$  /  $P A_t$ );
- recepção das posições de referência de cada junta;
- execução do algoritmo PID;
- devolução da posição atual de cada junta para o nível coordenador;
- detecção de colisão e envio de *byte* colisão para o nível coordenador.

Cada um destes processos está implementado, para cada duas juntas. A Figura 3.6 ilustra a estrutura do corpo principal do programa de controle de uma perna no nível atuador, sendo evidenciados o bloco de configuração de E/S que inclui tanto a leitura para conversão A/D das posições das juntas quanto a geração de saída PWM (*Pulse Width Modulation*) para acionamento dos atuadores e a configuração da porta paralela escrava. O fluxograma desta figura também referencia um procedimento de inicialização utilizado para garantir que a comunicação entre os níveis coordenador e atuador de controle só terá início quando os elementos processadores estiverem em condições ideais de trabalho.

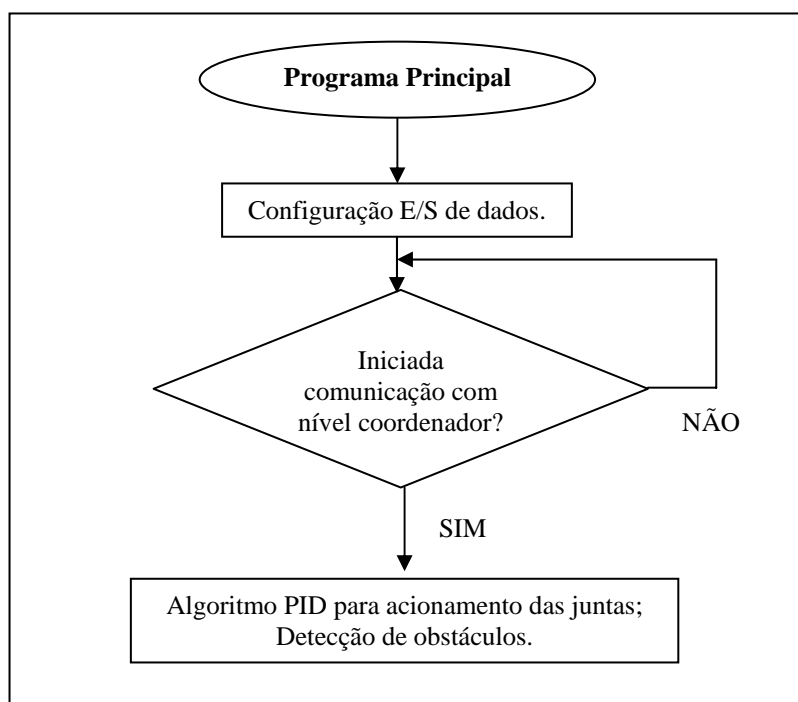


Figura 3.6 – Fluxograma do nível atuador de controle de uma perna.

Na ocorrência de colisão de uma ou mais pernas do robô com algum obstáculo, o que está sendo monitorado por quatro micro-chaves instaladas na pata de cada uma das pernas, será gerada por *polling* a chamada a uma rotina para tratamento de colisão, sendo esta rotina responsável por imediatamente parar o movimento da perna colidida e informar ao nível coordenador de controle a ocorrência da colisão. Este tratamento está ilustrado na Figura 3.7.

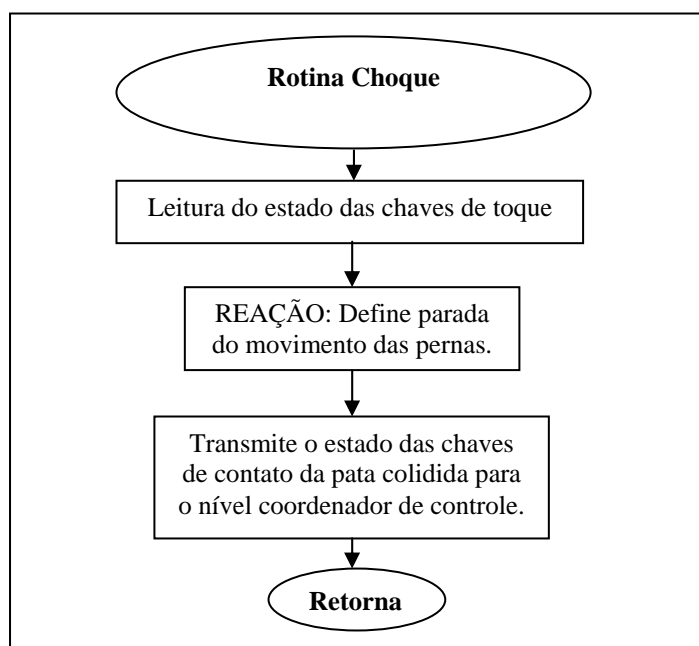


Figura 3.7 – Fluxograma da rotina de tratamento de colisão.

O uso de *polling* como recurso para detecção de ocorrência de colisão foi adotado com base no fato de que o tempo de processamento do algoritmo PID é de 2 ms. Isto levou a concluir, com base na dinâmica dos movimentos obtida pelos moto-redutores, que a esta frequência o *polling* é capaz de monitorar e informar em tempo hábil a ocorrência de colisões ao nível de controle coordenador.

### 3.4 O USO DA REDE CAN

A comunicação de dados entre o nível de controle supervisor e o nível de controle coordenador é realizada por uma rede CAN. O protocolo CAN foi concebido pela BOSCH em 1989, para fins de uso na indústria automobilística, de modo a viabilizar em baixo custo a instrumentação e controle em tempo real de veículos. A arquitetura padrão da rede CAN é multi-mestre serial e, face à vasta aplicabilidade deste protocolo, surgiram, a partir de então, inúmeras aplicações para o mesmo, dentre elas arquiteturas de controle para robôs móveis.

Algumas das características que motivam o uso de redes CAN nos sistemas de controle em tempo real são (Szabó, 2002): comunicação serial em até 1 Mb/s por broadcast, método de acesso ao meio CSMA/CD + AMP – *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection and Arbitration on Message Priority*; mensagens com 8 bytes de dados e 11 ou 29 bits identificadores, que são utilizados na definição de prioridades e na definição do nó destino; geração de bits pelo método NRZ (*Non Return to Zero*) com *stuffing bit*; e uso do algoritmo CRC (*Cyclic Redundancy Checks*) para detecção de erros.

Nos níveis supervisor e coordenador da arquitetura de controle proposta para o Guará concentram-se recursos importantes em *hardware* e detalhes relativos à formatação das mensagens CAN, que podem ser resumidos da seguinte forma (INTEL, 1996):

- cada controlador INTEL 82527 trabalha com 15 objetos de mensagem (mapeados em memória interna), contendo, cada objeto, 15 bytes;
- cada objeto de mensagem é constituído de 3 bytes de controle, quatro bytes para arbitração, e oito bytes para dados;
- cada objeto de mensagem pode ser configurado para transmissão ou recepção de mensagens, podendo ainda gerar interrupção a cada transmissão ou recepção com sucesso;
- há ainda registradores para definição de máscaras de filtro que permitem a identificação da mensagem em seu destino.

A Tabela 3.2 ilustra a composição de um objeto de mensagem do controlador CAN 82527 (Intel, 1996).

Tabela 3.2 - Objeto de mensagem CAN do controlador INTEL 82527.

Endereços	Funções
<b>Endereço Base + 0</b>	<b>Controle 0</b>
<b>+ 1</b>	<b>Controle 1</b>
<b>+ 2</b>	<b>Arbitração 0</b>
<b>+ 3</b>	<b>Arbitração 1</b>
<b>+ 4</b>	<b>Arbitração 2</b>
<b>+ 5</b>	<b>Arbitração 3</b>
<b>+ 6</b>	<b>Configuração de Mensagem</b>
<b>+ 7</b>	<b>Dado 0</b>
<b>+ 8</b>	<b>Dado 1</b>
<b>+ 9</b>	<b>Dado 2</b>
<b>+ 10</b>	<b>Dado 3</b>
<b>+ 11</b>	<b>Dado 4</b>
<b>+ 12</b>	<b>Dado 5</b>
<b>+ 13</b>	<b>Dado 6</b>
<b>+ 14</b>	<b>Dado 7</b>

Cada um dos endereços do objeto de mensagem é acessado pelo 80C196KB como endereço de entrada e saída (periférico), permitindo assim a configuração e a leitura dos dados recebidos. Complementando as informações relativas às configurações de mensagem na rede CAN utilizada, a Figura 3.17 ilustra a formatação padrão de uma mensagem (também é possível utilizar o formato estendido), com a descrição de todos os campos componentes e sua extensão, em *bits*.

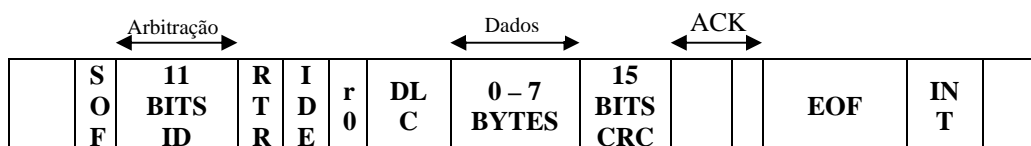


Figura 3.8 - Formatação de uma mensagem CAN padrão.

Nesta figura tem-se:

SOF (*Start of Frame*), que é um *bit* que marca o início da transmissão de um pacote;

*Bits* ID, que são *bits* de identificação utilizados para definir prioridades e o destino da mensagem;

RTR (*Remote Transmission Request*), que é a requisição para transmissão remota, fazendo parte do campo arbitração;

IDE, que é o identificador de extensão, que define se serão utilizadas mensagens padrão (11 *bits* identificadores) ou mensagens estendidas (29 *bits* identificadores);

r0, que é um *bit* reservado, definido como *bit* dominante (r0 = 0);

DLC (*Data Length Code*), que é o código de tamanho do dado, que define a quantidade de *bytes* que compõem o dado;

*Bits* CRC, que são 15 *bits* para detecção de erros por algoritmos CRC;

ACK (*Acknowledgement*), reconhecimento da recepção do dado no nó receptor;

EOF (*End of Frame*), que sinaliza o fim do pacote mensagem;

INT (*Intermission*), que são *bits* utilizados para separar pacotes sucessivos.

A extensão de cada um dos campos descritos na Figura 3.17 está definida na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Campos de uma mensagem CAN no formato padrão (INTEL, 1996).

<b>Campos da Mensagem</b>	<b>Extensão dos campos em <i>bits</i></b>
SOF	1
Arbitração	11
RTR	1
IDE	1
r0	1
DLC	4
Dados	0 – 64
CRC	16
ACK	2
EOF	7
<b>Total</b>	<b>44 - 108</b>

Conforme se pode observar na Tabela 3.3, 11 *bits* da mensagem CAN são destinados à arbitração, que define, em caso de disputa do barramento por dois ou mais controladores, qual mensagem será transmitida. Para explicitar este processo, a Tabela 3.4 ilustra a disputa do barramento por duas mensagens com arbitrações distintas. Vale ressaltar que o *bit* dominante na disputa é o “0”, e o recessivo é o “1”, e “-” define perda da disputa, ou seja, o nó da rede passa a apenas receber dados.

Tabela 3.4 – Exemplo de disputa de três mensagens pelo barramento CAN.

	t11	t10	t9	t8	t7	t6	t5	t4	T3	t2	t1
<b>Mensagens</b>	<b>bit 0</b>	<b>bit 1</b>	<b>bit 2</b>	<b>bit 3</b>	<b>bit 4</b>	<b>bit 5</b>	<b>bit 6</b>	<b>bit 7</b>	<b>Bit 8</b>	<b>bit 9</b>	<b>bit 10</b>
Referências	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0	0
Colisão	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Mensagem Vencedora	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0

Como a mensagem colisão é a que apresenta o menor valor de arbitração, ela torna-se a vencedora da disputa pelo barramento. A partir do instante  $t_3$ , o nó da rede transmissor de referências pára de transmitir e passa apenas a “ouvir” o barramento, pois o *bit* dominante (nível lógico baixo) da arbitragem da mensagem colisão vence a disputa sobre os *bits* recessivos (nível lógico alto) presentes em função da arbitragem de referências e posição atual. Até que se complete a transmissão da mensagem colisão, apenas o nó transmissor desta mensagem controla o barramento.

Um objeto de mensagem pode receber mensagens com distintos identificadores, pois a máscara de filtro pode ser genérica. Um *bit* “0” em tal máscara indica que o valor do *bit* equivalente no identificador da mensagem é irrelevante. Estas informações reforçam a escolha do barramento CAN em função da flexibilidade de aplicações que estes recursos proporcionam.

Tendo sido descrita toda a concepção da arquitetura de controle proposta para o Guará, tanto quanto ao *hardware* como quanto ao *software*, será apresentada no próximo capítulo a metodologia adotada para a implementação dos reflexos de manutenção do equilíbrio. Esta abordagem visa situar a estratégia de controle do Guará no estado da arte do controle de robôs móveis quadrúpedes, e apresentar uma contribuição para a tarefa de adaptação de um robô móvel quadrúpede a instabilidades de locomoção.

### 3.4.1 Agenda de mensagens (Algoritmos de Escalonamento)

Para que se possa garantir o controle do robô torna-se necessário adotar um critério para definição de prioridades e temporização que permita a todas as mensagens sua transmissão com respeito às restrições impostas pela estratégia de controle adotada. A definição deste critério deve considerar os seguintes procedimentos (Natale, 2001) (Hong, 2000) (Sabourin, 2004):

- especificação e classificação das mensagens a serem utilizadas quanto à periodicidade e grau de vinculação às restrições temporais (rígido ou suave);
- definição da “vida útil” das mensagens, ou seja, o intervalo de tempo no qual cada mensagem deve ser gerada e corretamente transmitida, para processamento no nó destino;
- intervalo de tempo utilizado para tratamento de mensagens transmitidas com erro.

Visando a melhor definição da agenda de mensagens de acordo com as características da aplicação do controle e natureza das próprias mensagens, são utilizados distintos algoritmos, que podem ser classificados em dois grandes grupos:

- Algoritmos de *scheduling* dinâmico;
- Algoritmos de *scheduling* estático.

No uso de *scheduling* estático das mensagens, definida a temporização da comunicação, as prioridades das mensagens são pré-fixadas e não mudam no decorrer do processo de controle (prioridades definidas em tempo de compilação). Já para algoritmos dinâmicos, as prioridades são definidas em tempo de execução (Kopetz, 1998).

### 3.4.2 Escolha do *scheduling* para o controle do GUARÁ

Os algoritmos para a definição de prioridades e recursos disponíveis ao processamento de mensagens em um sistema de controle definem o comportamento deste sistema. Em se tratando, nesta tese, de um robô quadrúpede, em função do algoritmo de *scheduling* tem-se a



velocidade de resposta na execução de tarefas, agilidade de reação a estímulos externos (detecção e transposição de obstáculos), controle da manutenção do equilíbrio durante sua locomoção e todas as demais ações necessariamente vinculadas à troca de mensagens.

Os algoritmos de *scheduling* dinâmicos baseiam-se em características temporais das mensagens, para associá-las às respectivas prioridades.

Dentre estes algoritmos podemos citar (Kopetz, 1998):

- *Rate Monotonic*: este algoritmo define a prioridade de uma mensagem na razão inversa de sua periodicidade, ou seja, quanto menor a periodicidade da mensagem maior será sua prioridade;
- *Earliest-Deadline*: neste algoritmo a maior prioridade é atribuída à mensagem sobre a qual se impõe o menor tempo de “vida útil”;
- *Least-Laxity*: este algoritmo relaciona a prioridade com o intervalo disponível de tempo entre o tempo de “vida útil” e o tempo gasto no processamento da mensagem. Quanto menor for este intervalo disponível, maior será a prioridade atribuída à mensagem.

O uso de algoritmos dinâmicos traz como vantagem a flexibilidade de adaptação às mudanças nas condições de controle (Hasnaoui, 2000). No caso do controle do Guará, a estratégia de controle se alterna entre locomoção livre no plano e transposição de obstáculos, além das futuras tarefas e conseqüentes mensagens relativas à identificação de objetos (visão). Esta alternância de comportamentos sugere o uso de um algoritmo de *scheduling* capaz de tratar distintas condições de periodicidade das mensagens e grau de vinculação às restrições de tempo (rigidez quanto ao tempo de “vida útil” das mensagens).

Entretanto, vale à pena ressaltar que os algoritmos de *scheduling* dinâmico são, comparativamente ao *scheduling* estático, de alto custo computacional (complexidade e tempo de execução). Este custo computacional se reflete na necessidade de elevação da frequência de relógio do processador, aumento da capacidade de armazenamento (em função de códigos de programação mais extensos), e uso de processadores aritméticos com exponenciação, radiciação e funções logarítmicas dentre outras.

Visando manter o foco deste trabalho na proposta de uma arquitetura de controle de baixo custo e complexidade de implementação, foi dispensado o uso de algoritmos de *scheduling* dinâmicos, sendo utilizadas prioridades definidas em tempo de compilação (*off-line*).

Tendo em vista que a restrição quanto ao tempo de geração e transmissão das mensagens utilizadas está bem flexível em função da dinâmica dos movimentos do robô, o critério adotado para definição das prioridades usa uma proporcionalidade direta com o grau de influência da informação contida na mensagem sobre a preservação do equilíbrio e integridade física do robô (Souza, 2004). Vale ressaltar que a pequena diversidade de tipos de mensagens favorece a aplicação do método utilizado.

Assim sendo, a maior prioridade foi atribuída à mensagem de colisão, lembrando que isto define o identificador desta mensagem com o menor valor dentre todos os identificadores. A distribuição completa das prioridades sobre as mensagens utilizadas, com os respectivos valores adotados, é apresentada no Capítulo 5 desta tese.

Com as características citadas, a rede CAN se apresenta como uma alternativa eficaz para o controle da comunicação de mensagens no Guará. Os recursos de arbitração de prioridades e detecção de erros inerentes ao protocolo CAN contribuem muito para a

transmissão correta de todas as mensagens sem que ocorram colisões de dados. O *broadcast* também é uma característica muito importante, face à necessidade de sincronismo do controle das pernas, bem como à propagação da informação de colisão com obstáculos. Outro fator importante é a possibilidade de uso de até oito *bytes* de dados, o que permite a inclusão, em um mesmo pacote, de diversos tipos de informação, como posição da junta, estado dos sensores e comandos de execução.

Também no processo de execução dos reflexos para manutenção da estabilidade de equilíbrio, a rede CAN desempenha uma função relevante, garantindo o tráfego de mensagens para sincronismo de ações entre os níveis supervisor e coordenador de controle. Esta comunicação contribui para a autonomia de ação do nível coordenador e do nível atuador de controle, durante a retomada de equilíbrio, sem conflito com ações definidas no nível supervisor de controle, mas permitindo a observação do estado do robô durante todo o tempo de execução dos reflexos.

## **4 COMPORTAMENTO REFLEXIVO DE ESTABILIDADE**

Na atualidade, muitas pesquisas em robótica móvel têm sido desenvolvidas com a meta de proporcionar a adaptação de robôs móveis a ambientes desestruturados. O objetivo destas pesquisas é melhorar a interação destes robôs com obstáculos em sua trajetória, outros robôs em uma comunidade, seres vivos da natureza e o homem (Fukuoka, 2003; Hu, 2000). Assim, evoluem as contribuições para a aplicação de robôs a tarefas como exploração espacial, agricultura, fins militares, e também o lazer.

Para que se possa dotar os robôs da capacidade de interação com ambientes cuja organização não seja pré-modelada, torna-se necessário que ações comportamentais destes robôs sejam definidas em tempo de execução das tarefas. Estas ações denominam-se “reflexos”, e são utilizadas com a finalidade de proporcionar melhoria de desempenho na realização de tarefas e também proteção da integridade física do robô.

Nesta tese, os reflexos implementados contribuem para a estabilidade de equilíbrio de um robô móvel quadrúpede, cujo sistema de locomoção (uso de pernas) impõe a necessidade de observação e controle de equilíbrio, ainda que não haja influências externas sobre o robô. Ou seja, para robôs a pernas, é alto o grau de relevância do uso de comportamentos reflexivos de estabilidade, pois mesmo a tarefa de locomoção pode dar origem a instabilidades de equilíbrio.

O desempenho de comportamentos reflexivos de estabilidade é fortemente influenciado pela velocidade de resposta às causas do desequilíbrio (distúrbios eletromecânicos, impactos, movimentos bruscos), razão pela qual é importante que as soluções adotadas permitam rapidez na tradução das informações obtidas dos sensores em ações de correção do equilíbrio.

Com base nesta linha de pesquisa, é apresentada neste capítulo a estratégia utilizada para a geração dos comportamentos reflexivos de estabilidade do Guará, implementada a partir das informações de um acelerômetro de dois eixos e com uso de controladores nebulosos para a definição de regras comportamentais.

### **4.1 COMPORTAMENTOS REFLEXIVOS PARA ROBÔS QUADRÚPEDES**

O controle da estabilidade de equilíbrio para robôs móveis quadrúpedes tem como regra geral a busca da postura que, anule o momento de balanço do corpo do robô em relação aos pontos de apoio das patas sobre o plano de navegação. Esta estratégia, é a ZMP (*Zero Momentum Point*); se traduz em corrigir a postura do robô durante a andadura de modo a manter a projeção do centro de gravidade do robô (CG) dentro do polígono de apoio das patas sobre o plano de locomoção, ou, em caso de equilíbrio dinâmico, manter a projeção do CG sobre a linha definida pelas patas de apoio (Kurazume, 2001). A Figura 4.1 ilustra posturas para a manutenção da estabilidade e geração de desequilíbrio de um robô quadrúpede.

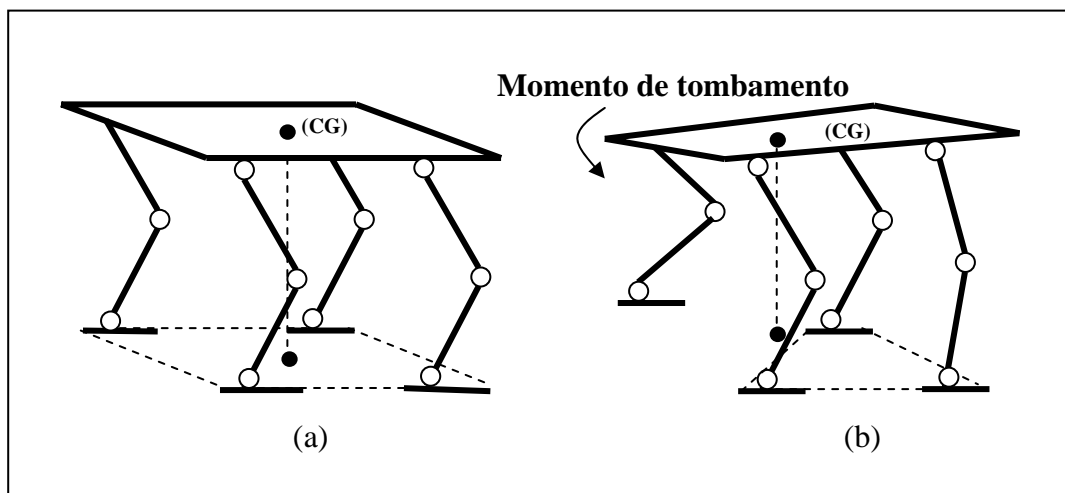


Figura 4.1 – (a) Condição de equilíbrio; (b) Condição de desequilíbrio.

A Figura 4.1 (a) apresenta uma postura em condição de equilíbrio, podendo-se observar que a projeção do centro de gravidade do robô está dentro do paralelogramo que define a base de apoio sobre o plano de locomoção. Já na Figura 4.1 (b) pode-se observar uma postura em que apenas três das quatro patas estão apoiadas sobre o plano de locomoção e, assim, o centro de gravidade do robô é projetado para fora do trapézio de apoio das patas, dando origem a um momento de tombamento que tende a inclinar o robô sobre a pata em suspensão (desequilíbrio).

A abordagem a respeito da estabilidade de equilíbrio para o Guará é estabelecida nesta tese com base em dois enfoques, que são: as estratégias de controle atualmente exploradas para robôs quadrúpedes e o detalhamento de movimentos de reflexo.

#### 4.1.1 Movimentos para reação ao desequilíbrio de robôs quadrúpedes

Conforme exemplificado no Capítulo 2 desta tese, a correção de postura do robô para obtenção de equilíbrio no decorrer da andadura é obtida através de movimentos de balanço do corpo do robô e manipulação de suas pernas. Estes movimentos são classificados em duas categorias: aqueles que priorizam o deslocamento da plataforma de maior massa para obtenção de equilíbrio (balanço do corpo), e os movimentos que utilizam a inércia das pernas para correção da postura.

A escolha dos tipos de movimento para os reflexos de estabilidade é influenciada por dois fatores principais, que são a causa do desequilíbrio e o tipo de andadura em execução. Em geral, os movimentos são balanços transversais, longitudinais (balanços da plataforma) e inclinações da plataforma em mergulho ou rolagem em relação à direção de locomoção, ou manipulação das pernas em seu espaço de trabalho, incluindo movimentos desassociados ao passo.

A Figura 4.2 ilustra uma sequência de posturas utilizada para retomada de equilíbrio após impacto lateral, obtida de experimentos executados com o BigDog ([www.inovacaotecnologica.com.br/noticias](http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias)).

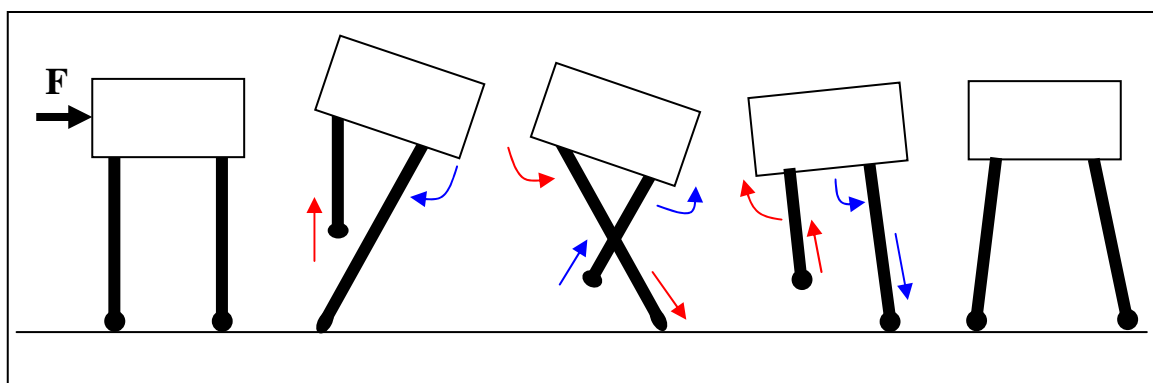


Figura 4.2 - Ilustração de reação ao desequilíbrio.

Na reação ilustrada o robô recebe um impacto lateral da esquerda para a direita que o obriga a abandonar os passos regulares de sua andadura retilínea, assumindo um deslocamento lateral para a direita de modo a evitar o tombamento. Só foram ilustradas duas das quatro pernas (vista frontal), mas as pernas traseiras reagem de maneira similar.

Nesta situação, o processo de tomada de decisão optou por deslocamento lateral, pois a intensidade do impacto recebido supera a capacidade de compensação do desequilíbrio apenas com um balanço da plataforma em sentido contrário ao impacto.

Uma descrição detalhada e ilustrada dos reflexos de estabilidade adotados para o Guará é apresentada no item 4.3 deste capítulo.

#### 4.1.2 Estratégias para controle de equilíbrio de robôs quadrúpedes

O uso de comportamentos reflexivos em robôs quadrúpedes implica na presença de uma camada de controle hierarquicamente mais alta, na composição da arquitetura de controle do robô. Esta estrutura de controle é exigida pelo fato de que no nível de controle de execução dos comportamentos reflexivos não necessariamente são processados modelos para definição dos movimentos a serem executados além de algoritmos para sincronismo de movimentos das pernas, com o objetivo de redução do custo computacional e ganho na velocidade de resposta.

Assim, neste nível de controle a preocupação é a recuperação em tempo real da estabilidade de equilíbrio, ficando a responsabilidade da recuperação de postura para reinício de andadura transferida para a camada de controle hierarquicamente superior.

Esta topologia para arquitetura de controle vem sendo explorada por pesquisas que fazem uso da analogia com o sistema biológico animal (cães, gatos e outros quadrúpedes), e estruturam arquiteturas com um nível de controle hierarquicamente superior, responsável por supervisão e planejamento, e um nível inferior, responsável pelos reflexos. Neste enfoque, atualmente duas estratégias se destacam, a saber o controle clássico com uso da modelagem cinemática e dinâmica para a tomada de decisão sobre qualquer tarefa a ser executada (Ridderström, 2003), e o uso de um gerador central de padrões de comportamento, normalmente definido por redes neurais artificiais, integrado a um sistema de controle reflexivo, que pode fazer uso de redes neurais artificiais ou uso da lógica nebulosa (Peng, 2003). As Figuras 4.3 (a) e (b) ilustram as estruturas de controle utilizadas por estas duas estratégias.

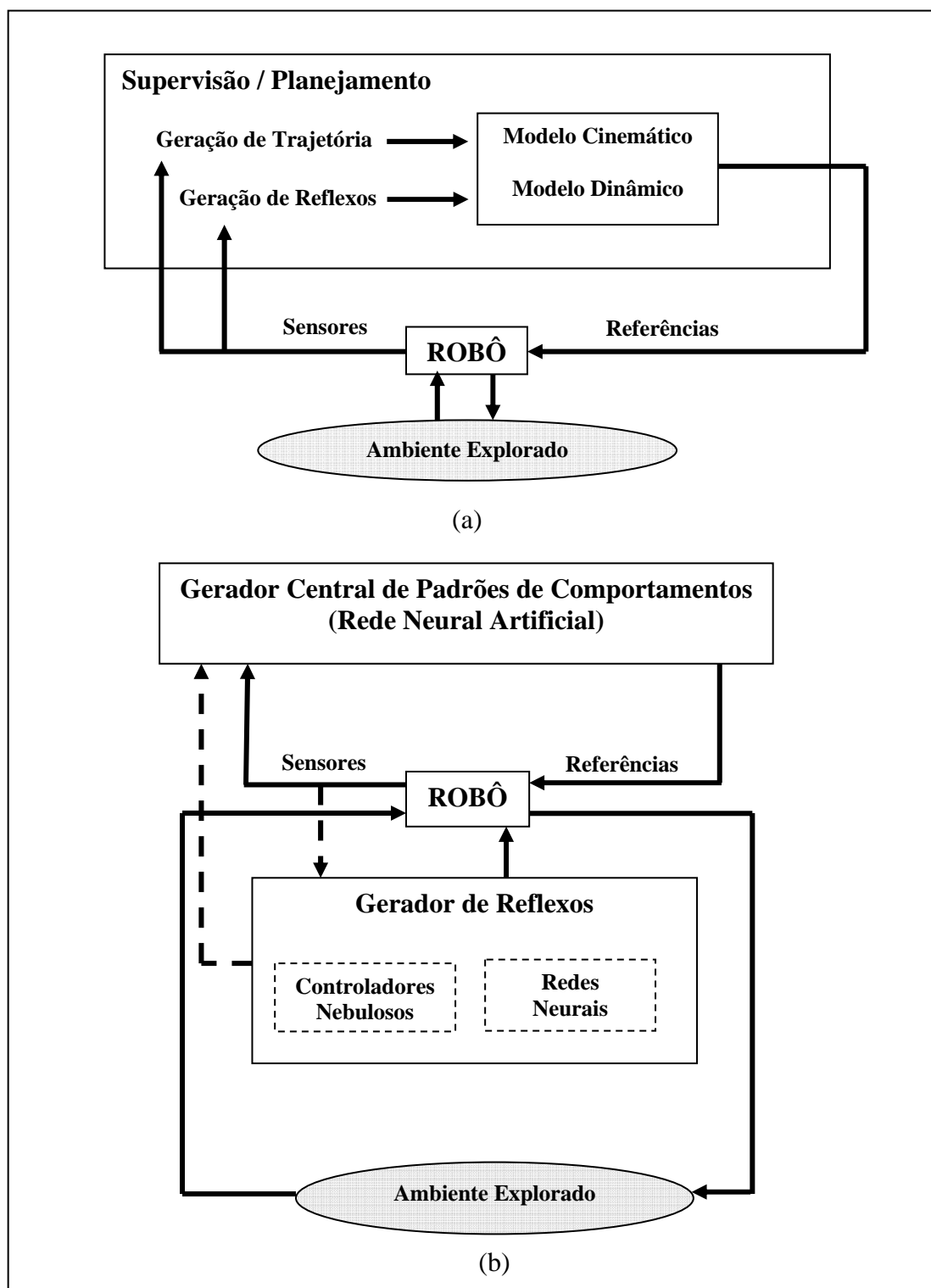


Figura 4.3 – (a) Estratégia de controle e geração de comportamentos reflexivos baseados em modelos; (b) Estratégia de controle baseada em Inteligência Artificial para geração de padrões de comportamentos com reflexos.

O uso exclusivo de modelos matemáticos para a definição de padrões de comportamento e reflexos de estabilidade apresenta-se como uma solução de alto custo computacional, e sofre diversas influências de sua parametrização (Ridderström, 2003). O custo computacional é função da necessidade de processamento de relações não-lineares cinemáticas e dinâmicas, além da influência das mudanças dos parâmetros destes modelos

(momentos de inércia, torques resistentes), a depender dos movimentos realizados e também do tempo de uso do robô.

Quanto à aplicação de técnicas de inteligência artificial (uso de redes neurais artificiais e lógica nebulosa), há a vantagem na independência de modelos matemáticos, e na redução de custo computacional, porém aumenta o custo de sintonia dos algoritmos de controle (treinamento de redes neurais artificiais e ajuste de funções de pertinência), com uma exigência mais intensa de experimentação prática, para aprimoramento do grau de desempenho do controle (Kulitz, 2004).

As divergências de desempenho existentes entre as técnicas disponíveis para a geração de comportamentos reflexivos motivam pesquisas em busca do aprimoramento destas estratégias de controle. A solução proposta para a geração de reflexos de estabilidade do Guará se enquadra neste esforço de apresentar contribuições à obtenção de comportamentos reflexivos de estabilidade para um robô quadrúpede.

## **4.2 A ESTRATÉGIA PROPOSTA PARA CONTROLE DA ESTABILIDADE**

Com o objetivo de aproveitar as melhores características das estratégias de controle encontradas na pesquisa bibliográfica a estratégia proposta para o controle de estabilidade do Guará mescla o controle clássico com a aplicação da lógica nebulosa, e uma reduzida dimensão do espaço das variáveis analisadas (aceleração em duas direções) para definição do estado de equilíbrio.

Nesta estratégia usa-se a modelagem cinemática para a geração da andadura (com balanço transversal) no traçado de trajetórias retilíneas e curvilíneas, e no controle da margem de estabilidade. As reações para manutenção da estabilidade de equilíbrio são definidas a partir da leitura de um acelerômetro de dois eixos, com o qual se detecta a tendência de desequilíbrio, sendo aqui consideradas apenas inclinações da plataforma (mergulho ou rolagem).

Definido o estado de equilíbrio do robô e sua postura, obtida por observação da condição de apoio das patas e dos limites cinemáticos de cada junta das pernas, podem ser gerados os reflexos de estabilidade para correção de postura com uso de controladores nebulosos. Destes controladores obtém-se as referências para acionamento das juntas de cada perna, que são transferidas aos controladores PID de posição de cada junta.

A Figura 4.4 apresenta a estratégia utilizada no Guará para controle da estabilidade de equilíbrio.

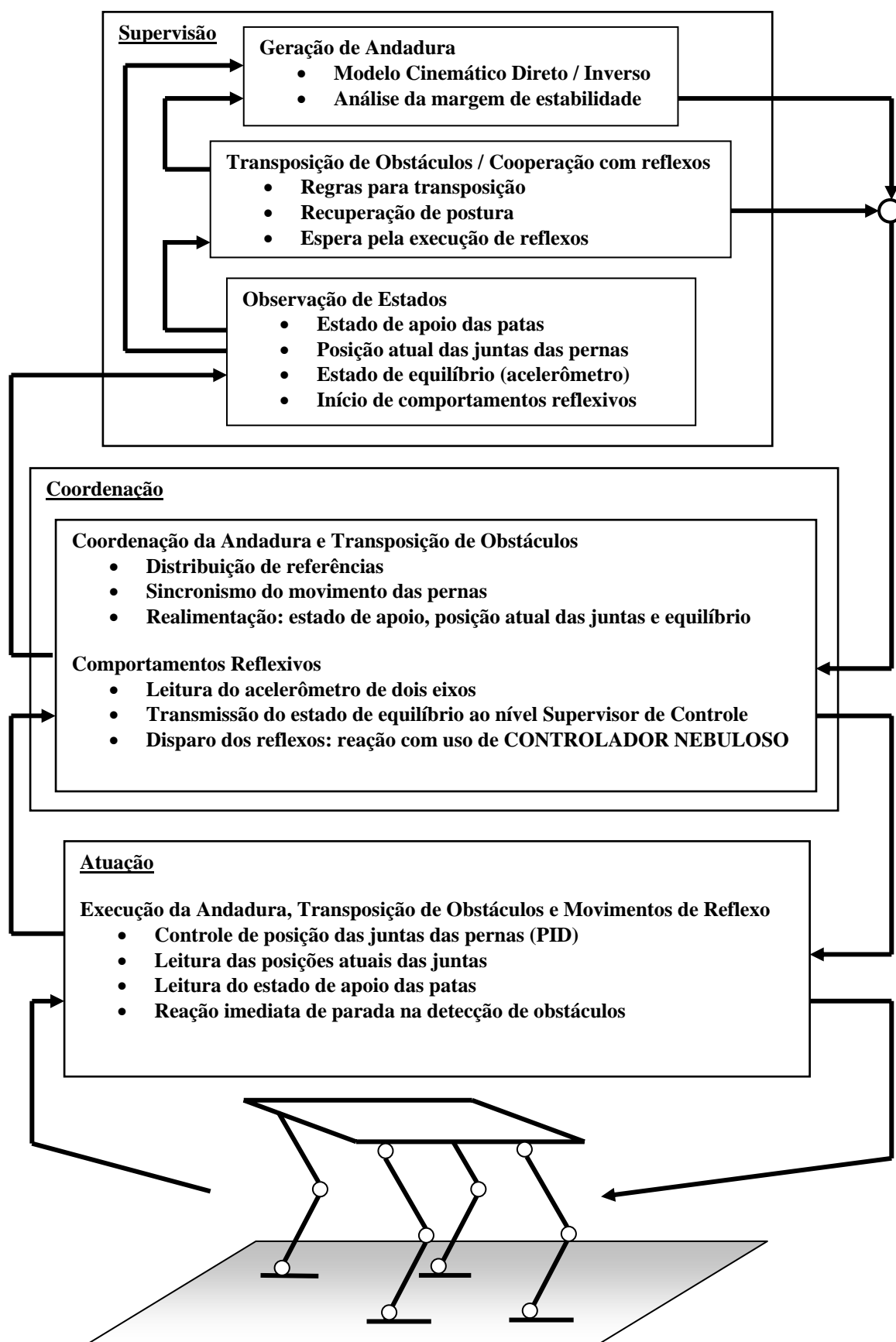


Figura 4.4 - Processos para controle da estabilidade de equilíbrio do Guará.



Para melhor compreensão do grau de autonomia hierárquica de cada nível de controle da arquitetura proposta, é apresentado o detalhamento da funcionalidade de cada bloco componente destes níveis de controle.

#### **4.2.1 A supervisão no controle da estabilidade**

Este nível de controle delibera sobre a execução das ações “locomção livre” (trajetória retilínea e curvilínea) e “transposição de obstáculos”, a depender do estado observado do robô.

A execução destas ações inicia-se com o processamento da modelagem cinemática, utilizada para a geração das referências da andadura, para a análise da margem de estabilidade e também para a correção de postura na transposição de obstáculos. Estas tarefas são atribuídas ao nível supervisor de controle, já que neste nível se dispõe do estado atual de todas as pernas (posição atual das juntas e condição de apoio sobre a superfície de locomoção), o que possibilita a geração de referências com a manutenção do sincronismo de movimentos das pernas e conseqüente equilíbrio de locomoção.

Na Figura 4.4 pode-se observar que dependendo do estado corrente do robô, é definida a geração de andadura, a transposição de obstáculos ou a espera pela conclusão da reação às instabilidades de equilíbrio (reflexos).

Durante a execução da andadura, caso seja detectado algum obstáculo, o nível supervisor de controle inicialmente posiciona o robô em uma condição estável de equilíbrio, identifica (ainda pelo sensor tátil) o obstáculo encontrado, dispara regras para a transposição, e então gera referências para um padrão de movimentos.

Uma seqüência diferente de processamento ocorre quando reflexos são disparados no nível coordenador de controle. Neste caso, a supervisão coopera, interrompendo a geração e envio de novas referências e observa o estado de equilíbrio vigente, até que seja possível reassumir o controle dos movimentos com a recuperação de postura, para reinício da locomoção.

Para reinício da locomoção, é necessário o uso da modelagem cinemática, pois a postura ao final da execução dos reflexos de estabilidade não necessariamente se enquadra no padrão das posturas subseqüentes de uma andadura. Assim, torna-se necessária a recuperação de postura com observação da margem de estabilidade e limites cinemáticos das juntas das pernas.

Todo o desenvolvimento do software de controle da supervisão é apresentado em (Bento, 2007).

#### **4.2.2 A coordenação no controle da estabilidade**

O nível coordenador de controle contribui para a estabilidade de equilíbrio, através da distribuição das referências, geradas na supervisão, para os atuadores de cada perna, executando a realimentação de estado corrente do robô ao nível supervisor e gerando os reflexos de estabilidade com o uso da lógica nebulosa.

As referências são seqüenciadas de modo a sincronizar pernas em vôo, pernas em empuxo, balanço transversal e avanço ou recuo da plataforma. Este sincronismo é obtido em tempo real com uso da comunicação via barramento CAN, e definição simultânea do momento de troca de referências para todos os atuadores das pernas, ou seja, estão em

sincronismo a correta geração das referências e o controle temporal de execução destas referências.

Para que o nível supervisor de controle possa deliberar sobre as ações a serem realizadas, faz-se uso da realimentação de informações que definem o estado corrente do robô, que são: a posição atual de todas as juntas das pernas, o estado das chaves de contato das patas sobre a superfície de locomoção, e a resposta do acelerômetro (que compõe o estado de equilíbrio). A realimentação destas informações é formatada e sequenciada para comunicação via barramento CAN, no nível coordenador de controle, no qual verifica-se a coerência dos dados, e a ocorrência e correção de falhas de comunicação, sendo mantida a temporização necessária para que a locomoção do robô possa se manter estável e equilibrada.

Também no nível coordenador de controle são gerados os reflexos de estabilidade, que definem reações do robô às instabilidades de equilíbrio a partir da observação do estado de apoio das patas e do sinal lido do acelerômetro de dois eixos como indicação do estado de equilíbrio, e considerando a natureza da causa do desequilíbrio. É importante citar que para a geração dos reflexos, há uma comunicação de sincronismo entre os níveis supervisor e coordenador de controle, de modo a evitar o conflito na execução das suas ações.

Para a geração dos reflexos de estabilidade, o nível coordenador de controle faz a leitura e o condicionamento do sinal obtido do acelerômetro de dois eixos, a análise do estado de apoio de cada perna, através das micro-chaves de toque instaladas nas patas, e a inferência aos controladores nebulosos para obtenção de reações sincronizadas das pernas. Durante este processo a coordenação assume o total controle do robô, até que seja obtida uma condição de equilíbrio estável para a retomada da andadura.

### 4.2.3 Os atuadores no controle da estabilidade

No nível atuador de controle são processados os movimentos das pernas que estabelecem o controle da estabilidade de equilíbrio, durante a andadura, na transposição de obstáculos e na execução dos reflexos. Este nível de controle define a dinâmica da transição entre posturas planejadas no nível supervisor, e também realimenta ao nível coordenador o estado de apoio das patas, a posição atual de cada junta das pernas e a ocorrência de colisão com algum obstáculo.

Todo o desempenho do controle de estabilidade depende da resposta dinâmica dos atuadores às ações impostas sobre este nível controle. Para isto, as malhas de controle dos atuadores têm que garantir níveis aceitáveis de precisão para o controle das variáveis de interesse (posição e velocidade de atuação das juntas), e também manter de forma ininterrupta a realimentação das variáveis de estado ao nível coordenador de controle.

A autonomia da atuação quanto aos reflexos de estabilidade se limita à detecção tátil de obstáculos, e a definição de parada imediata dos movimentos, com realimentação deste estado aos níveis superiores de controle.

Da abordagem descrita, destaca-se que a estratégia de controle proposta para o Guará executa o primeiro nível de reação no controle dos atuadores com a parada imediata dos movimentos na detecção da presença de obstáculos, ou detecção de instabilidades, por inclinação imprópria da plataforma. A partir desta condição podem ser disparados reflexos de estabilidade no nível coordenador de controle, ou a transposição de obstáculos definida pelo nível supervisor de controle.

Nesta estratégia de controle a reação à instabilidade de equilíbrio ou o controle de transposição de obstáculos são propagados desde o nível hierárquico mais baixo de controle até o nível supervisor, que é o mais alto, de modo que a recuperação da estabilidade é composta pela interação destes níveis de controle. Para cada um destes níveis de controle

atribui-se um grau de autonomia à composição do comportamento reflexivo, sendo esta autonomia de reflexo tátil por perna, no nível atuador de controle, reflexo comportamental sincronizado para as quatro pernas no nível coordenador e geração de movimentos para correção da andadura no nível supervisor de controle.

A análise a seguir detalha e justifica a escolha da estratégia de controle do equilíbrio aplicada ao Guará, explicitando todos os recursos utilizados na estruturação desta solução.

#### 4.2.4 O uso das chaves de contato nas patas

O estado de apoio do robô sobre a superfície de navegação é uma informação essencial para a tomada de decisão quanto ao tipo do reflexo de estabilidade a ser gerado.

Durante a execução da andadura (em trajetória retilínea ou curvilínea), já é incluído o balanço transversal da plataforma do robô para compensar, por aumento da margem de estabilidade, a ausência do apoio de uma das quatro pernas durante a execução dos passos. Este balanço, que não é caracterizado como reflexo, mas sim um dos movimentos componentes da andadura, exige o uso das chaves de contato nas patas, para que o nível supervisor de controle reconheça o estado de apoio do robô e decida o momento adequado para vôo das pernas.

A Figura 4.5 ilustra o sincronismo do balanço da plataforma com o vôo da perna 0 na execução da andadura. Pode-se observar que o balanço transversal com deslocamento lateral à esquerda define a projeção do CG do robô distante das linhas fronteiras da área de apoio das suas patas, aumentando a margem de estabilidade.

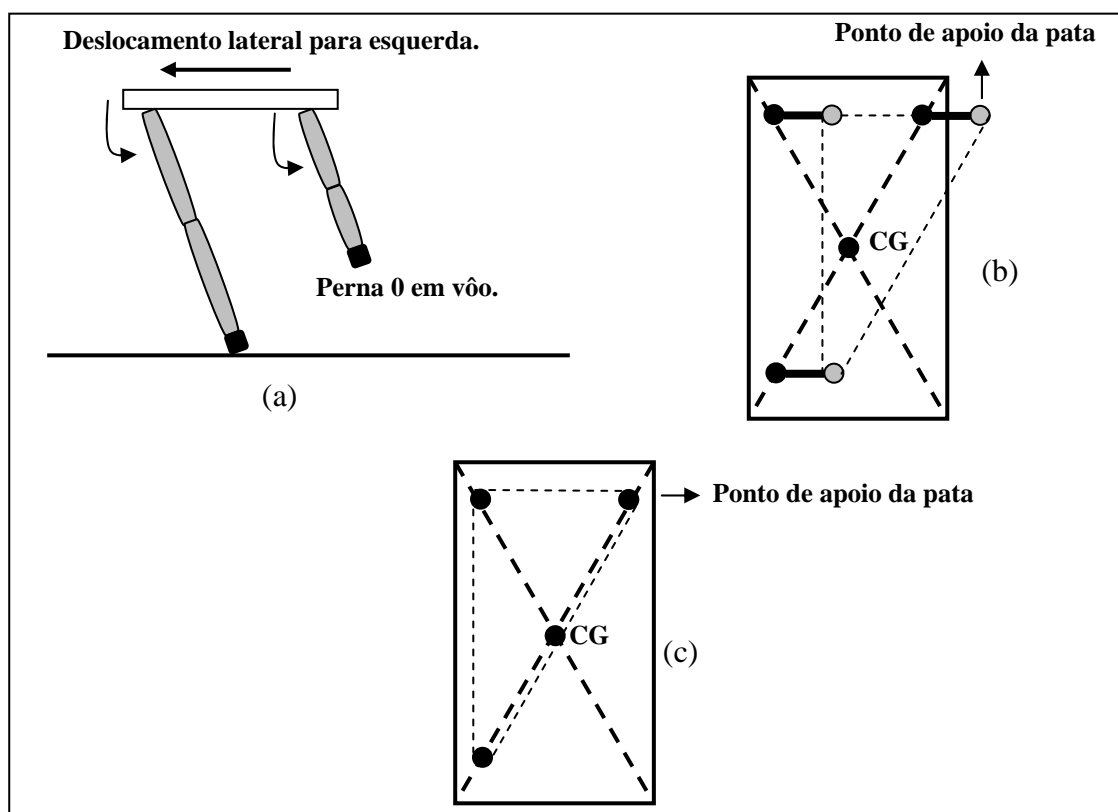


Figura 4.5 – (a) Balanço da plataforma (vista frontal); (b) Vista de cima com projeção do CG sobre o triângulo de apoio das patas; (c) Vista de cima com projeção do CG sobre o triângulo de apoio das patas, sem balanço lateral (redução da margem de estabilidade).

Na execução dos reflexos de estabilidade a análise do estado de apoio do robô precede ao disparo do reflexo, o que permite a decisão quanto ao movimento adequado da pata em suspensão para retomada do equilíbrio. Assim, o algoritmo de reação implementado inicialmente analisa o estado de apoio das quatro patas, para só então definir o acionamento das pernas (em geral apoiando patas em suspensão) quanto à direção, sentido e velocidade do movimento.

A principal vantagem do uso de chaves de contato, para a detecção do estado de apoio do robô, é o baixo custo de processamento lógico e de instalação física. Entretanto, este tipo de sensoramento não fornece a informação da carga suportada por cada uma das quatro pernas, o que enriqueceria a análise do controlador nebuloso, para que a geração de reflexos pudesse corrigir a postura do robô equilibrando a carga sobre as pernas.

Este equilíbrio de carga sobre as pernas apoiadas mantém uma média de esforços sobre os elementos atuadores das pernas (motoredutores CC), o que contribui para a vida útil dos mesmos e estabelece uniformidade na capacidade de reação das pernas (Albiez, 2001; Santos, 2003).

#### 4.2.5 O uso do acelerômetro

Diversos sensores são utilizados para suprir informações aos sistemas de controle de robôs móveis, podendo ser classificados em grandes grupos como sensores internos, sensores externos, sensores visuais e não-visuais (Murphy, 2000). A escolha dos tipos de sensores a serem utilizados no projeto de um robô está vinculada ao tipo das tarefas a serem realizadas, ao custo financeiro e computacional planejado e também é vinculado à viabilidade de adaptação destes sensores ao robô.

No projeto do Guará as condições vigentes são as execuções de trajetórias retilíneas e curvilíneas e a transposição de saliências e depressões retangulares (considerados obstáculos). Neste universo de tarefas ainda não foi incluído o reconhecimento (mapeamento) dos obstáculos presentes no curso da trajetória.

Para suprir informações ao controle de equilíbrio de robôs quadrúpedes destinados a esta classe de tarefas, são normalmente utilizados giroscópios, inclinômetros e acelerômetros. Os giroscópios têm a função de corrigir a orientação do robô, evitando desvios de trajetória que, se acumulados, podem gerar grandes erros de posicionamento. Já os inclinômetros detectam a inclinação da plataforma do robô, possibilitando manter as condições de equilíbrio e, em alguns casos, viabilizando o transporte de carga.

Quanto aos acelerômetros, estes são normalmente utilizados para a função de odometria, cujos principais objetivos são a mensuração e o controle da velocidade, e de distâncias percorridas (posicionamento no ambiente de navegação). O uso do acelerômetro nesta função é alvo de diversas pesquisas, dentre elas (Ojeda, 2002) e (Tan, 2005), que já comprovaram restrições devido à influência de ruídos de aceleração por vibrações presentes na estrutura do robô em movimento, e também à existência de um erro inerente a sensores inerciais (*drift* de aceleração), intensificado pela necessidade de integração da aceleração para obtenção de velocidade e posição.

Estas restrições quanto ao uso do acelerômetro motivam a aplicação de sensoramento integrado, no qual diversos sensores (inclusive visuais) fornecem as informações necessárias aos processos de controle, para garantir bom desempenho na realização das tarefas. Entretanto, vale também ressaltar, que dos sensores citados o acelerômetro é o de mais baixo custo de aquisição e, dependendo de sua aplicação, também proporciona baixo custo computacional para o tratamento das informações que disponibiliza (como será confirmado na geração de reflexos para o Guará) (Parsa, 2001).

Para a geração dos reflexos de estabilidade de equilíbrio do Guar, o sensor escolhido foi um acelerômetro de dois eixos, do qual se obtém tensões proporcionais  aceleração da plataforma do robô na direção de seus eixos, e também  inclinação de mergulho ou rolagem desta plataforma (acelerações decompostas da aceleração da gravidade). Estas informações são suficientes para a detecção da tendência de desequilíbrio na realização das tarefas propostas (trajetórias retilíneas e curvilíneas e transposição de obstáculos retangulares), e não necessariamente exigem o tratamento de integração do sinal do acelerômetro, livrando a solução adotada da influência do *drift*. Como consequência desta escolha, obtém-se a redução de custo e complexidade para implementação da solução, se comparada ao sensoriamento que integra informações de diversos tipos de sensores.

Na solução proposta para o Guar, o acelerômetro utilizado  parte do módulo ADXL-202E (*Analog Devices*, 2000), e um diagrama de blocos funcional do circuito deste acelerômetro está ilustrado na Figura 4.6.

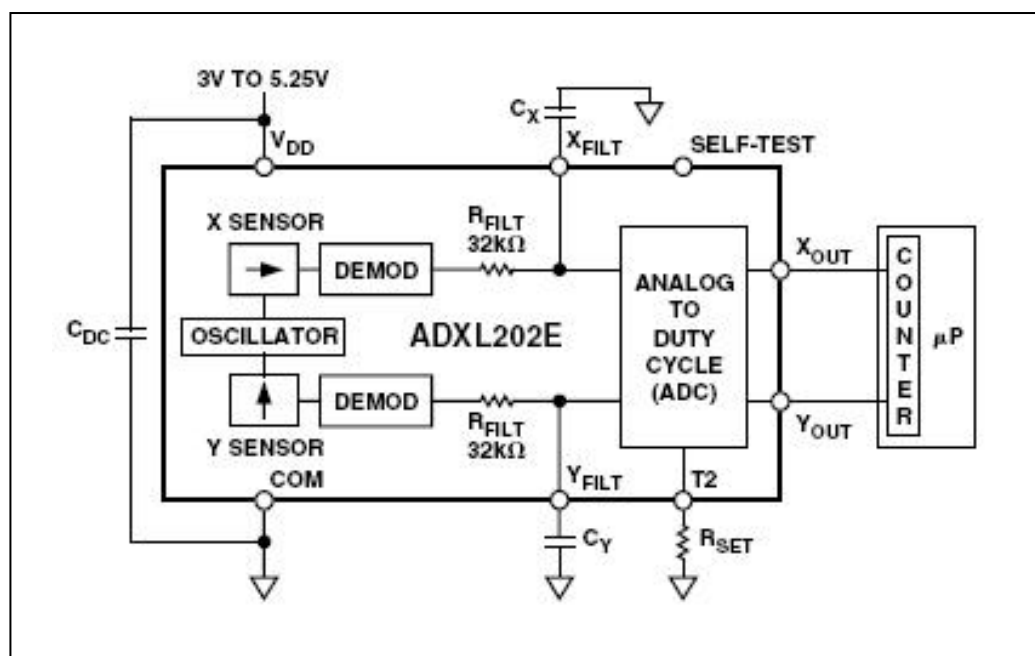


Figura 4.6 - Esquema elétrico do acelerômetro ADXL-202E (*Analog Devices*, 2000).

Do circuito apresentado na Figura 4.6 é importante ressaltar que estão disponíveis nas saídas  $X_{FILT}$  e  $Y_{FILT}$  sinais cujo *off-set*  de 2,5 V e, para inclinações de  $\pm 90^\circ$  nas direções X e Y ou acelerações, esta tensão varia em  $\pm 0,3$  V. Já nas saídas  $X_{OUT}$  e  $Y_{OUT}$  os sinais são modulados por largura de pulso, com período definido pelo valor de  $R_{SET}$ . Todos os detalhes técnicos para uso deste acelerômetro estão contidos em (*Analog Devices*, 2000).

O módulo ADXL-202E foi fixado no centro geométrico do corpo do Guar, sendo alimentado por uma fonte independente de tensão contínua, conforme ilustra a Figura 4.7. Esta posição foi escolhida pelo fato de que as forças exercidas sobre este centro geométrico, e o deslocamento sofrido pelo mesmo em relação ao polígono ou linha de apoio das patas do robô sobre o solo, estabelecem a condição de equilíbrio.

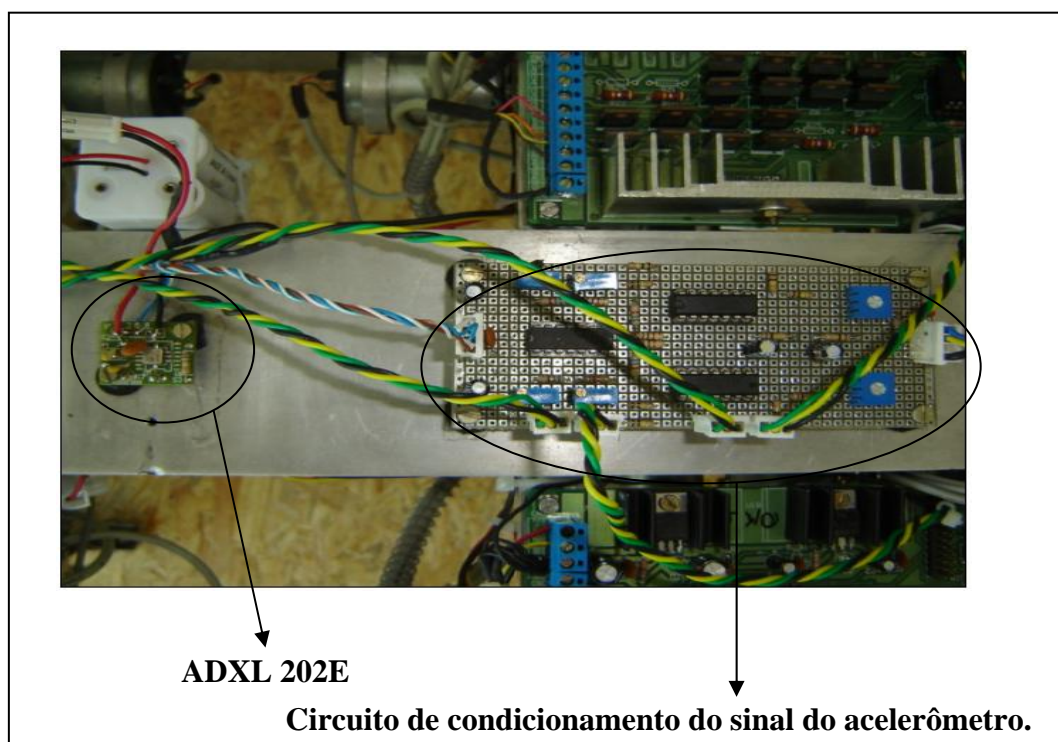


Figura 4.7 - Posicionamento do acelerômetro no corpo do Guará.

A informação obtida do acelerômetro para cada eixo é definida a partir da saída modulada por largura de pulso, que é filtrada com filtro passa-baixas passivo, e então subtrai-se o *off-set* inerente ao acelerômetro (2,5 V) para amplificação do erro equivalente ao desequilíbrio da plataforma. Na recomposição do sinal a ser amostrado pelo conversor A/D do 80C196KB, adiciona-se novamente o *off-set*. Esta estratégia visa minimizar a influência de ruídos e obter um valor médio de comportamento adequado (estável), para o sinal a ser realimentado aos controladores nebulosos em cada perna.

Com isto, reduz-se a incidência de erros na previsão de desequilíbrio do robô. A Figura 4.8 apresenta um diagrama de blocos funcional do circuito utilizado para condicionamento do sinal do acelerômetro.

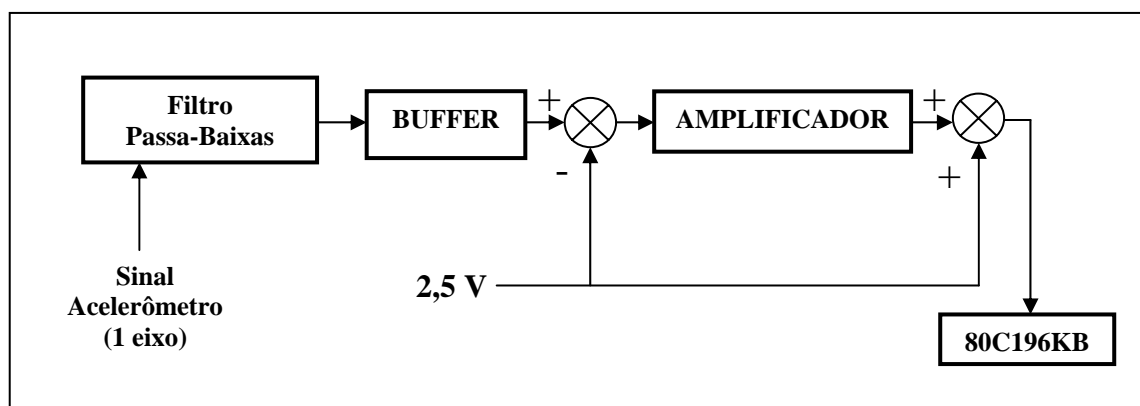


Figura 4.8 - Condicionamento do sinal do acelerômetro.

Após o condicionamento do sinal obtido do acelerômetro, é realizada uma interpretação do mesmo para que sejam definidos os limites da aceleração ou inclinação a partir dos quais serão disparados os reflexos de estabilidade. Esta interpretação é importante,

pois os movimentos executados pelo robô durante a andadura geram, em condições normais de equilíbrio, oscilações de aceleração e inclinação, que no processo de disparo dos reflexos devem ser desconsideradas.

Além da identificação dos limites que determinam o disparo dos reflexos de estabilidade, a partir do sinal obtido do acelerômetro também se faz a identificação da causa do desequilíbrio. A causa tratada nesta pesquisa é a inclinação indesejada da plataforma em mergulho ou rolagem.

No Capítulo 5 serão apresentados os perfis de aceleração obtidos em tempo de execução da andadura, evidenciando-se os limites de disparo dos reflexos, assim como a identificação da causa do desequilíbrio.

Com os sinais obtidos é feita a conversão A/D para a definição das variáveis de entrada MERG (mergulho) e ROL (rolagem) do algoritmo de controle nebuloso, utilizado para a geração dos reflexos. Justificada a escolha do uso do acelerômetro para geração dos reflexos de estabilidade, pode-se descrever os reflexos implementados e a avaliação de desempenho dos mesmos.

### 4.3 REFLEXOS DO GUARÁ COM USO DE CONTROLADORES NEBULOSOS

Os reflexos de estabilidade implementados para o Guará são disparados a partir das informações providas pelo acelerômetro, referentes à inclinação da plataforma. Estes reflexos são denominados avanço, recuo, balanço à esquerda, balanço à direita, agachar e levantar.

Cada um destes reflexos é obtido a partir dos seguintes movimentos das pernas:

- a) avanço, pernas inclinando para a frente do robô;
- b) recuo, pernas inclinando para a traseira do robô;
- c) balanço à esquerda, pernas inclinando para a lateral esquerda do robô (junta zero de todas as pernas em rotação no sentido horário);
- d) balanço à direita, pernas inclinando para a lateral direita do robô (junta zero de todas as pernas em rotação no sentido anti-horário);
- e) agachar, pernas flexionando (as quatro ou duas a duas) abaixando ou inclinando o corpo do robô;
- f) levantar, pernas esticando (as quatro ou duas a duas) levantando ou inclinando o corpo do robô.

Para os reflexos agachar e levantar pode-se acionar as quatro pernas ou duas delas. Com isto obtém-se o mergulho frontal, o mergulho traseiro, a inclinação lateral direita, a inclinação lateral esquerda, o agachamento total e a suspensão total. A Figura 4.9 ilustra a postura do robô quando submetido a alguns dos reflexos implementados.

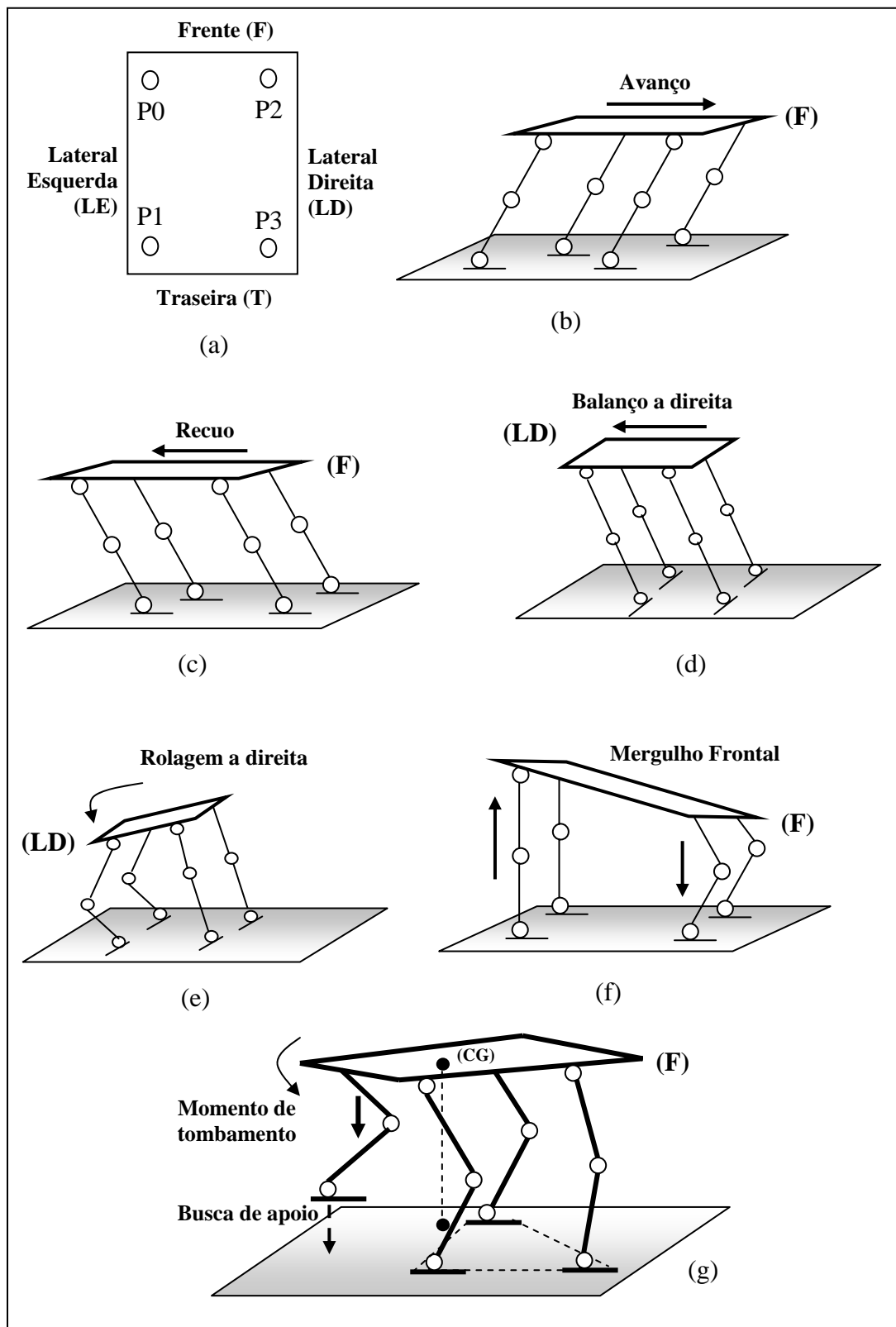


Figura 4.9 - Postura resultante de alguns reflexos de estabilidade do Guarã.



Cada um destes reflexos, ou uma composição deles, responde a distintas informações obtidas do acelerômetro. Esta relação entre a natureza do sinal obtido do acelerômetro e reflexos disparados é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Relação entre sinal do acelerômetro e reflexo disparado.

<b>Causa do desequilíbrio / Sinal do Acelerômetro</b>	<b>Reflexo disparado</b>
Suspensão dianteira / inclinação em mergulho traseiro.	Agachar dianteira e levantar traseira.
Suspensão traseira / inclinação em mergulho dianteiro.	Levantar dianteira e agachar traseira.
Tombamento lateral à esquerda / inclinação de rolagem à esquerda.	Levantar lateral esquerda, agachar lateral direita e balanço à direita.
Tombamento lateral à direita / inclinação de rolagem à direita.	Levantar lateral direita, agachar lateral esquerda e balanço à esquerda.
Tombamento com uma perna em vôo / inclinação composta de mergulho e rolagem.	Apoiar perna em vôo e corrigir a inclinação da plataforma, com o movimento das 4 pernas apoiadas sobre a superfície de navegação.

Todos os reflexos citados têm por objetivo compensar a influência de distúrbios externos (inclinação imprópria da plataforma), para permitir a manutenção de uma margem de estabilidade que garanta o equilíbrio do robô. Para explicitar a natureza não linear das relações cinemáticas entre o acionamento dos graus de liberdade de cada perna do robô e a margem de estabilidade, são analisadas no item 4.3.1 algumas configurações dos reflexos a serem implementados.

#### **4.3.1 Análise da relação entre graus de liberdade e margem de estabilidade**

Serão analisadas duas configurações para reflexos de estabilidade, a saber, a manutenção da margem de estabilidade através dos movimentos de mergulho e rolagem da plataforma. Estas análises permitem a comprovação de que implementar a solução de reflexos de estabilidade por uso de processamento matemático da relação entre graus de liberdade e margem de estabilidade (processamento de modelos) implica em alto custo computacional (tratamento de relações não lineares), e, conseqüentemente, tempo de processamento.

Na primeira análise considera-se a necessidade de acionamento das pernas para mudar a inclinação da plataforma na direção longitudinal ao movimento de locomoção (inclinação em mergulho), com manutenção da posição do CG (centro de gravidade). Esta mudança de inclinação em mergulho da plataforma pode ser utilizada para compensar uma mudança na inclinação do plano de locomoção ou para compensar a ocorrência de um movimento impróprio que mude de forma indesejável a inclinação da plataforma.

A Figura 4.10 (a) ilustra por uma vista lateral simplificada o Guará em posição de início de locomoção, com os respectivos referenciais adotados para esta análise, e a Figura 4.10 (b) ilustra uma configuração de inclinação da plataforma em mergulho com manutenção do CG na mesma posição cartesiana.

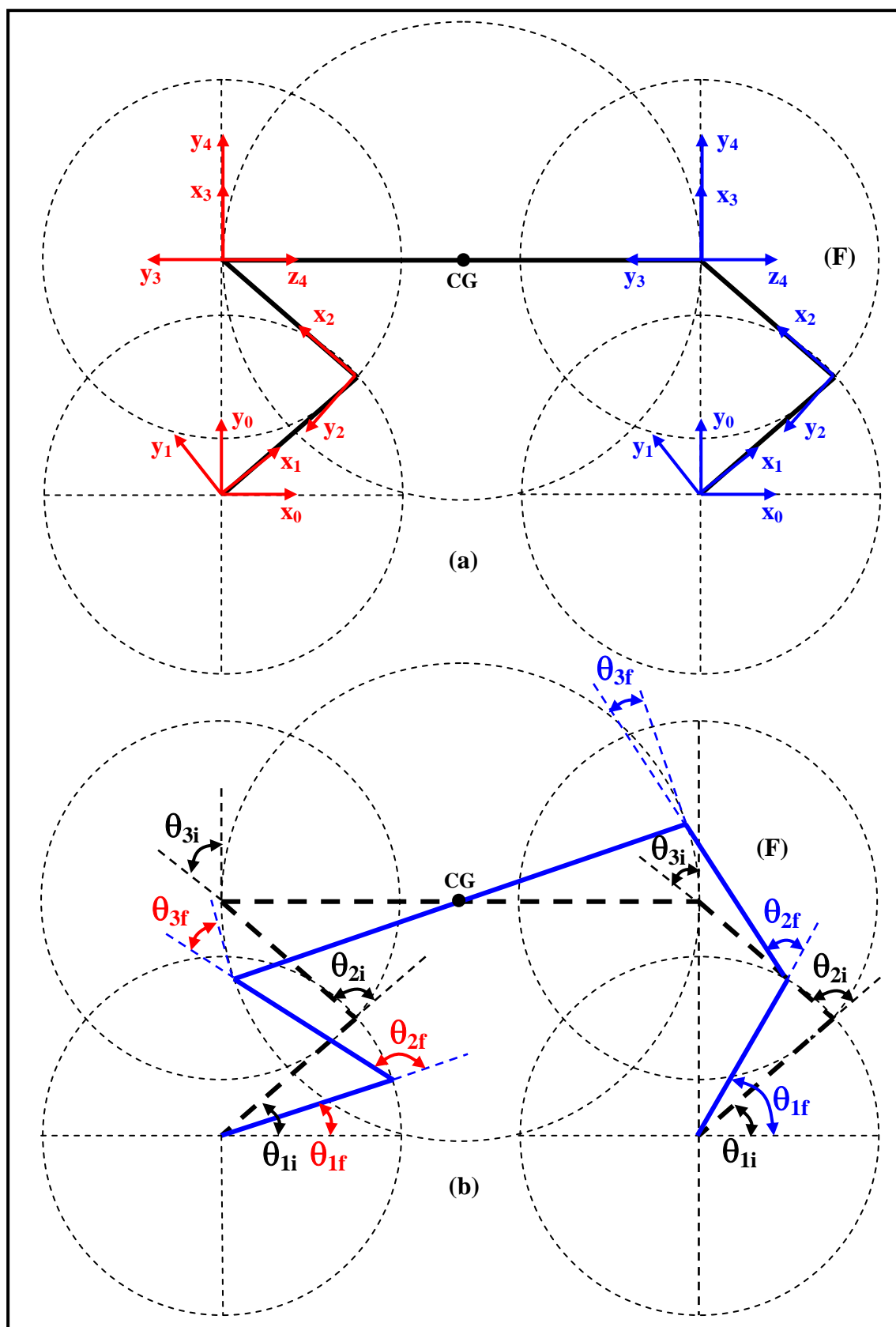


Figura 4.10 – (a) Vista lateral simplificada do Guarà com fixação de sistemas de referência na convenção Denavit-Hartenberg; (b) Vista lateral simplificada do Guarà na postura necessária para compensação de mergulho da plataforma.

Pode-se observar, na Figura 4.10 (b), que a manutenção da posição cartesiana do CG com a execução do reflexo (o que, nesta situação, significa manutenção da margem de estabilidade) na condição de inclinação em mergulho ilustrada, exige o acionamento conjunto dos graus de liberdade, de modo a estabelecer flexão das pernas traseiras (pernas 1 e 3) e extensão das pernas dianteiras (pernas 0 e 2). Esta condição também pode ser invertida, flexão das pernas dianteiras e extensão das pernas traseiras, a depender do reflexo necessário a ser disparado pelo robô.

Assim como na situação de inclinação em mergulho, para rolagem da plataforma também se consegue, por acionamento sincronizado dos graus de liberdade, manter a posição do CG da plataforma de modo a permitir a estabilidade de equilíbrio. As Figuras 4.11 (a) e (b) ilustram dois estados com manutenção da estabilidade de equilíbrio na condição de rolagem da plataforma.

É importante ressaltar que a Figura 4.11 (b) explicita a possibilidade de compensação da inclinação por rolagem da plataforma, por acionamento sincronizado das pernas em movimentos opostos de flexão e extensão.

A condição necessária para garantir a estabilidade de equilíbrio é manter, durante os movimentos executados, o ponto de projeção do CG da plataforma sobre o plano de locomoção, interno ao polígono de apoio das patas. A descrição algébrica da relação entre os graus de liberdade das pernas e a posição do CG da plataforma na realização de reflexos de estabilidade pode ser obtida com o emprego da convenção de Denavit-Hartenberg e respectivas matrizes de transformação aplicadas às pernas do Guará.

Em (Bento, 2007) é apresentada a descrição algébrica completa para a verificação da pertinência do ponto de projeção do CG do Guará em relação à área interna do polígono de apoio das patas, o que permite a definição da margem de estabilidade. Esta descrição explicita a não-linearidade das relações entre os graus de liberdade do robô e a margem de estabilidade, o que, conseqüentemente, se reflete em custo computacional, sendo este um fator indicativo para o emprego do controle nebuloso na geração dos reflexos de estabilidade.

Assim, o custo de implementação dos algoritmos para processamento dos modelos algébricos na geração dos reflexos é transferido para a tarefa de minuciosa descrição qualitativa minuciosa dos reflexos (regras comportamentais) e escolha adequada das funções de pertinência. As regras comportamentais utilizadas baseiam-se em relações geométricas, tais como as ilustradas nas Figuras 4.10 e 4.11, que comprovam a compensação da margem de estabilidade na ocorrência de inclinação indesejada da plataforma.

As funções de pertinência serão sintonizadas para a obtenção de uma relação satisfatória entre velocidade e suavidade de movimentos na execução dos reflexos. O objetivo é garantir a preservação da integridade física do robô, o que significa evitar quedas, tombamentos ou movimentos bruscos que possam prejudicar o acionamento eletro-mecânico das pernas.

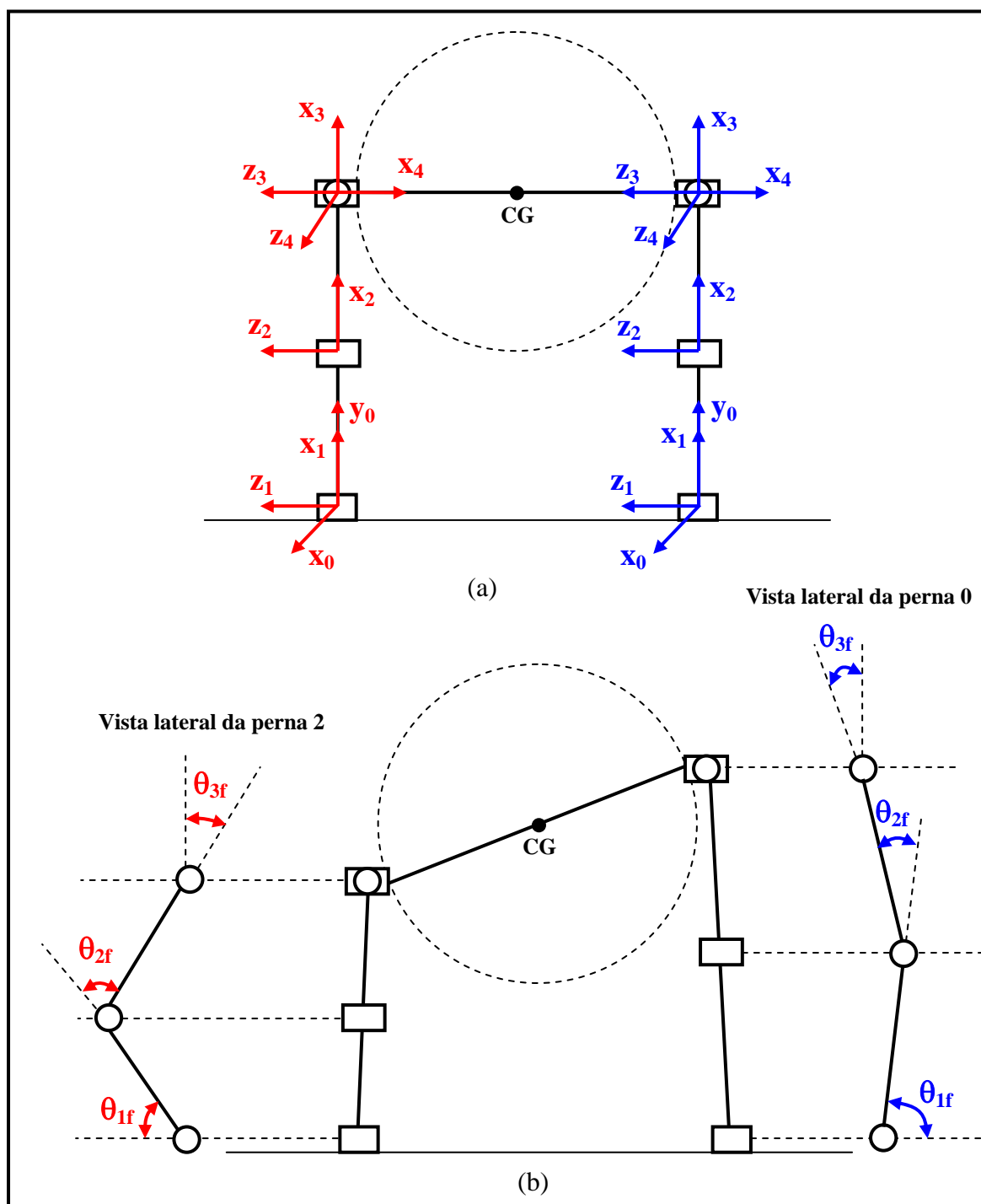


Figura 4.11 – (a) Vista frontal simplificada do Guar com fixação de sistemas de referência na convenção Denavit-Hartenberg; (b) Vista frontal simplificada do Guar na postura necessária para compensação de rolagem da plataforma.

### 4.3.2 Projeto dos controladores nebulosos

Para a geração dos reflexos de estabilidade de equilíbrio do Guará estão implementados quatro controladores nebulosos, um para cada perna.

O uso de controladores nebulosos contempla um dos focos da solução proposta, pois esta técnica de controle não exige a descrição por modelos cinemáticos ou dinâmicos dos comportamentos do robô. O custo desta solução é transferido para a necessidade de uma descrição qualitativa dos comportamentos reflexivos, adequados às situações de instabilidade em estudo, de modo a permitir ações de controle que garantam a retomada de equilíbrio do robô.

Estes controladores recebem simultaneamente a informação gerada pelo acelerômetro e o estado de apoio das pernas sobre a superfície de locomoção e, por inferência em suas bases de regras, que são distintas para cada perna, para que se consiga compor uma reação coerente de postura geram o sinal de controle responsável pelo movimento de reflexo de cada uma das mesmas. O processo de inferência nebulosa, executado a partir da detecção de uma instabilidade de equilíbrio, pode ser detalhado da seguinte forma:

1. o nível supervisor de controle estabelece para cada controlador nebuloso os valores que definem as funções de pertinência e os limites cinemáticos de cada junta das pernas;
2. as acelerações medidas são transmitidas simultaneamente para os quatro processadores 80196KB do nível coordenador de controle (um de cada perna), assim como o estado das micro-chaves de toque de cada pata monitorado pelo nível atuador de controle, e a posição atual de cada junta, obtida dos potenciômetros. Estas informações são disponíveis para uso dos controladores nebulosos na geração dos reflexos de estabilidade;
3. detectada uma instabilidade de equilíbrio, é disparada simultaneamente nas quatro pernas a inferência nebulosa para geração dos reflexos de estabilidade;
4. a inferência nebulosa considera a natureza da causa do desequilíbrio (se é inclinação da plataforma em mergulho ou rolagem) que é caracterizada pelo comportamento das acelerações medidas, o estado de apoio da pata sobre a superfície de locomoção (apoiada ou em voo), e os limites cinemáticos das juntas da perna. Estes comportamentos estão ilustrados, para distintas condições de instabilidade de equilíbrio, no Capítulo 5 desta tese;
5. cada controlador nebuloso avalia o estado de apoio da perna que controla sobre a superfície de locomoção, e define, em função desta condição e da natureza da instabilidade indicada pela aceleração medida, as regras comportamentais a serem utilizadas;
6. o sinal de controle da saída da inferência nebulosa pode ser classificado como reação de pequena intensidade, de média intensidade ou de grande intensidade (conforme ilustra a Fig. 4.11). O nível de intensidade é traduzido em deslocamento angular de cada junta da perna, sendo este movimento restrito pelos limites cinemáticos estabelecidos para cada junta;

7. definida uma ação de reflexo, os controladores nebulosos estabelecem novas referências para cada junta, que são transmitidas ao nível atuador de controle, para definição de uma correção de postura do robô. A definição das regras se baseia na melhoria (aumento) da margem de estabilidade, logo, corrigir a postura significa realizar movimentos que projetem o CG do robô no interior da área de apoio das patas sobre o plano de locomoção.  
O processo de correção de postura se repete a partir do passo 2 citado acima, até que seja atingida uma condição de estabilidade de equilíbrio.

As bases de regras utilizadas por cada controlador nebuloso são distintas, para que se consiga, na ocorrência das instabilidades de equilíbrio, a correção sincronizada e coerente da configuração posicional de juntas, de modo a permitir a retomada do equilíbrio. Um exemplo que se pode dar é a correção da instabilidade de equilíbrio causada por inclinação excessiva em mergulho frontal, para a qual deve-se esticar as pernas dianteiras e flexionar as traseiras. Ou seja, uma condição de instabilidade de equilíbrio exige regras comportamentais disparadas para as pernas dianteiras distintas das regras disparadas para as pernas traseiras, o que justifica a diferenciação entre as bases de regras de cada controlador nebuloso (detalhes no Capítulo 5).

As Figuras 4.12 e 4.13 ilustram, respectivamente, a malha de controle implementada em cada perna para a geração dos reflexos e o processo de inferência nebulosa para a definição do tipo e intensidade do reflexo necessário. Estas figuras são referentes apenas à perna 0 (zero), sendo que nas demais pernas o sistema de geração de reflexos é similar, e as quatro pernas são sincronizadas pelo acesso simultâneo à aceleração medida e definição das regras comportamentais.

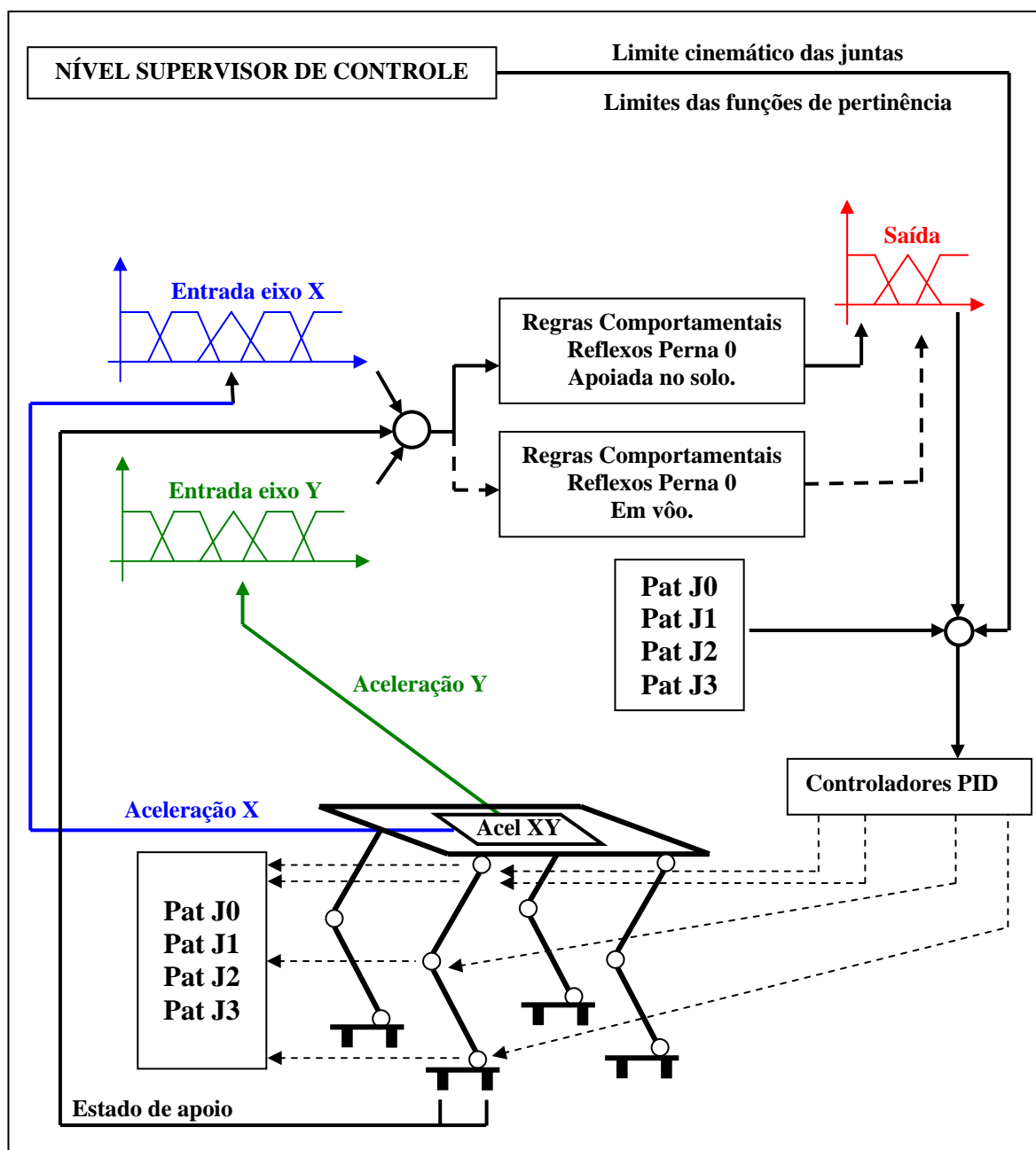


Figura 4.12 - Malha de controle para geração dos reflexos de estabilidade.

Na Figura 4.12 a nomenclatura Pat Ji é utilizada para definir Posição atual da i-ésima junta da perna.

A primeira etapa na elaboração dos controladores nebulosos foi a escolha dos conjuntos nebulosos de entrada que classificam o sinal obtido do acelerômetro, e os conjuntos nebulosos de saída, dos quais se obtém o sinal de controle para os reflexos de cada perna.

Os conjuntos nebulosos de entrada são identificados com os termos lingüísticos: negativo grande, negativo pequeno, zero, positivo pequeno e positivo grande. Esta escolha permite que sejam filtrados valores de ruído gerados sobre o sinal do acelerômetro, em função das oscilações de andadura do robô (filtro com o conjunto nebuloso zero), e, ainda consegue-se distinguir quatro níveis de aceleração ou inclinação (positivo ou negativo, pequeno e grande) para a definição de reflexos com intensidade adequadamente graduada.

Os termos lingüísticos usados para os conjuntos nebulosos de saída foram definidos como pequeno, médio e grande, em uma referência à intensidade do reflexo necessário em cada perna para a correção da postura do Guará e retomada do equilíbrio.

As funções de pertinência adotadas, para cada conjunto nebuloso de entrada e saída, estão ilustradas na Figura 4.13.

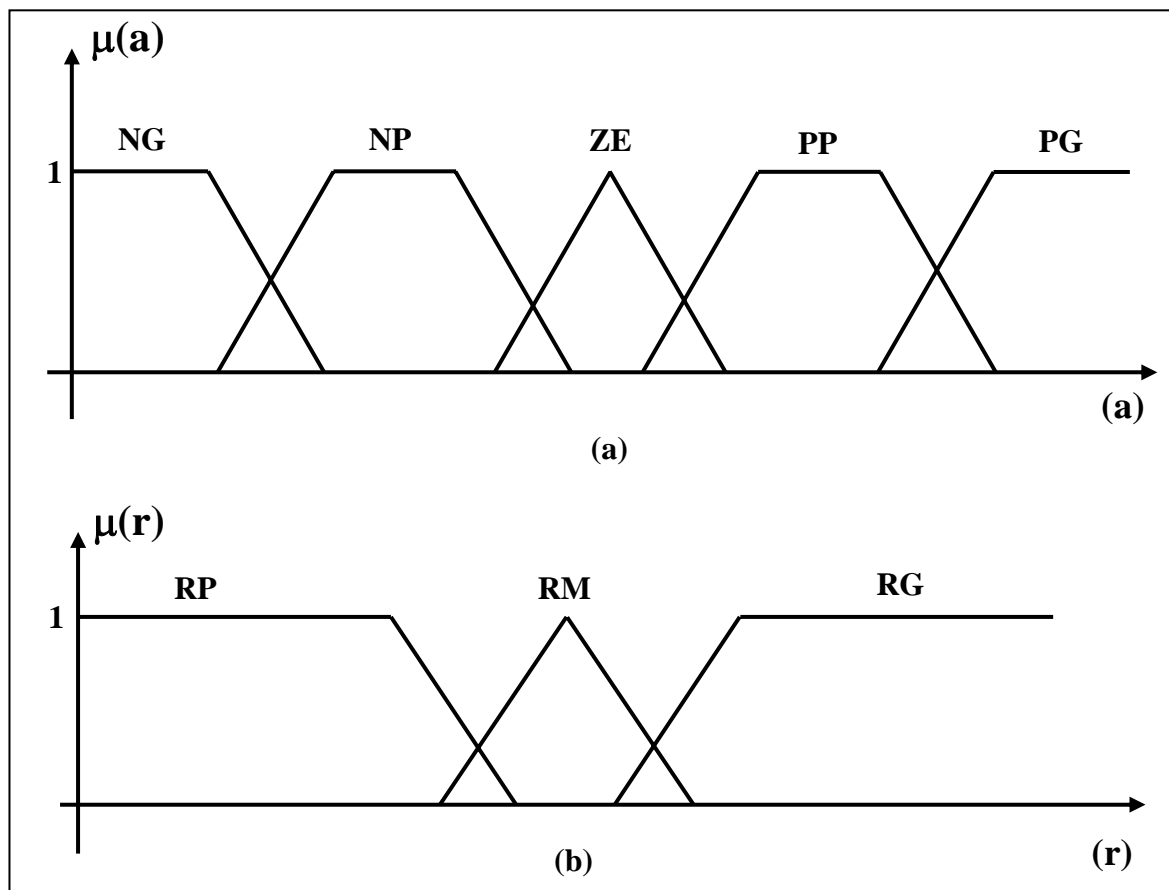


Figura 4.13 – (a) Funções de pertinência para os conjuntos nebulosos de entrada; (b) Funções de pertinência para os conjuntos nebulosos de saída.

Sendo:

(a) – Sinal do Acelerômetro;  
 (r) – Reação;  
 NP – Negativo Pequeno;  
 NG – Negativo Grande;  
 ZE – Zero;  
 PP – Positivo Pequeno;  
 PG – Positivo Grande;

RP – Reação de Pequena intensidade;  
 RM – Reação de Média intensidade;  
 RG – Reação de Grande intensidade;  
 $\mu(a)$  – Pertinência da Aceleração;  
 $\mu(r)$  – Pertinência da Reação.

Para a obtenção da sintonia adequada de controle dos reflexos, os conjuntos nebulosos foram definidos de forma independente para cada eixo de leitura do acelerômetro.

Mapeados os valores obtidos do acelerômetro em conjuntos nebulosos de entrada, com definição da pertinência a estes conjuntos, faz-se então a inferência aos bancos de regras para que se obtenha a classificação ainda nebulosa do sinal de controle. Como foram escolhidos cinco conjuntos nebulosos de entrada para cada eixo de saída do acelerômetro, a priori são definidas 25 regras para expressar cada um dos 6 reflexos de uma perna.



O modelo (matriz) utilizado para registro das regras comportamentais está ilustrado na Tabela 4.2, sendo que a nomenclatura utilizada por reflexo de cada perna é a seguinte:

ES - Esticar                      BE - Balanço à esquerda                      AV - Avanço  
EN - Encolher                      BD - Balanço à direita                      RC - Recuo

Tabela 4.2 - Modelo do banco de regras comportamentais.

Instabilidade por inclinação de rolagem da plataforma																			
Pernas		Perna 0						Perna 1						Perna 2					
Estado de Apoio		Solo						Solo						Solo					
Reação		E	E	B	B	A	R	E	E	B	B	A	R	E	E	B	B	A	R
Merg	Rol	S	N	E	D	V	C	S	N	E	D	V	C	S	N	E	D	V	C
NG	NG		R	R		R			R	R		R		R		R		R	
NG	NP		R	R		R		R		R		R		R		R		R	
NG	ZE		R			R		R				R		R				R	
...	...																		
NP	NP		R	R		R		R	R			R		R		R		R	
NP	ZE		R			R		R				R		R				R	
NP	PP	R			R	R		R			R	R		R		R	R		R
...	...																		
ZE	NG		R	R					R	R				R		R			
ZE	NP		R	R					R	R				R		R			
ZE	PP	R			R			R			R			R		R			
...	...																		
PP	NG		R	R			R		R	R			R	R		R			R
PP	NP		R	R			R		R	R			R	R		R			R
PP	ZE	R					R		R				R	R					R
...	...																		
PG	NP	R		R			R		R	R			R	R		R			R
PG	ZE	R					R		R				R	R					R
PG	PP	R			R		R		R		R		R			R		R	R

As regras foram estabelecidas com prioridade de compensação das instabilidades geradas por rolagem, pois a margem de estabilidade na direção transversal ao movimento de locomoção é inferior à margem da direção longitudinal. Assim, na ocorrência de instabilidade de equilíbrio em rolagem e mergulho, os reflexos de cada perna priorizam a correção da inclinação de rolagem, sem deixar de contribuir para a correção da inclinação de mergulho.

Duas condições de instabilidade são destacadas em vermelho na Tabela 4.2 para as quais são ilustrados os reflexos executados na correção da inclinação da plataforma.

A primeira condição destacada em vermelho na Tabela 4.2, indica a ocorrência de uma grande inclinação de mergulho negativa, sem nenhuma rolagem, conforme indica a classificação da aceleração medida. Para esta condição a correção de postura do robô exige que as pernas traseiras do Guará sejam esticadas e as pernas dianteiras flexionadas, e todas as

pernas avancem a plataforma. Por esta razão a matriz de regras indica reação de grande intensidade (RG), para encolher as pernas 0 e 2, reação de grande intensidade, para esticar as pernas 1 e 3, e reação de avançar em grande intensidade para todas as pernas.

A Figura 4.14 (a) ilustra esta condição de instabilidade por inclinação de mergulho da plataforma e a Figura 4.14 (b) ilustra a reação necessária para correção de postura. Esta ilustração é de uma vista lateral direita do Guará, por isto só estão representadas as pernas 2 e 3. Entretanto, as pernas 0 e 1 também reagem para obtenção da correção de postura e retomada do equilíbrio.

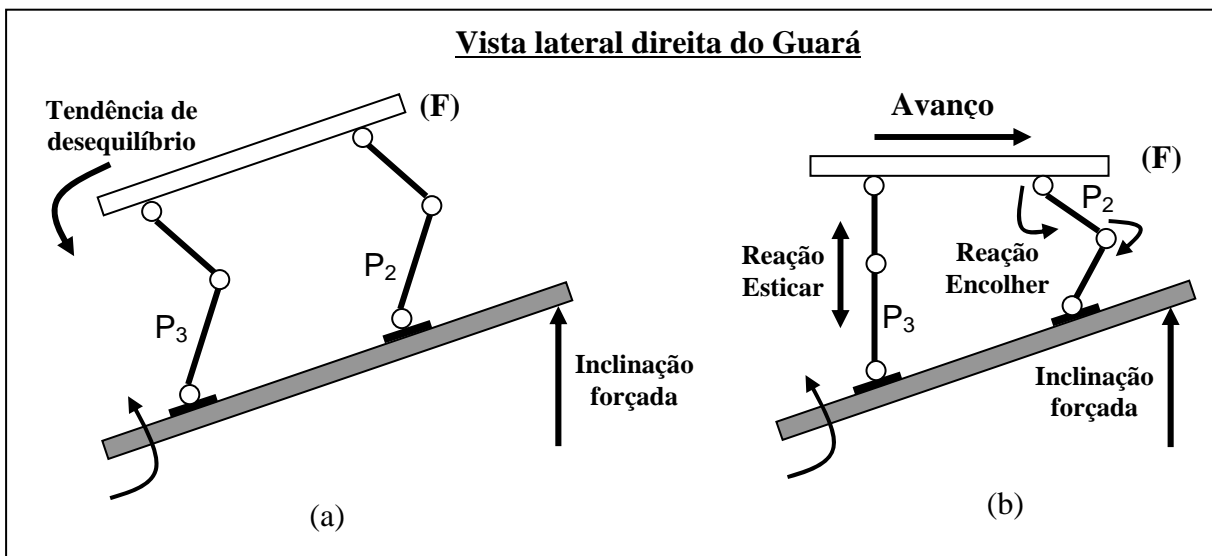


Figura 4.14 – (a) Instabilidade de equilíbrio gerado por inclinação da plataforma; (b) reflexo gerado para correção da postura da plataforma.

A instabilidade registrada na Tabela 4.2 e ilustrada na Figura 4.14 (a) dispara as seguintes regras comportamentais do controlador nebuloso, para correção de postura:

Perna 0:

*Se Mergulho é Negativo Grande e Rolagem é Zero então Encolher Grande e Avançar Grande*

Perna 1:

*Se Mergulho é Negativo Grande e Rolagem é Zero então Esticar Grande e Avançar Grande*

Perna 2:

*Se Mergulho é Negativo Grande e Rolagem é Zero então Encolher Grande e Avançar Grande*

Perna 3:

*Se Mergulho é Negativo Grande e Rolagem é Zero então Esticar Grande e Avançar Grande.*

A Figura 4.15 (a) ilustra a segunda condição de instabilidade de equilíbrio evidenciada na Tabela 4.2 em vermelho, por inclinação de rolagem, e a Figura 4.15 (b) ilustra o reflexo para retomada de equilíbrio.

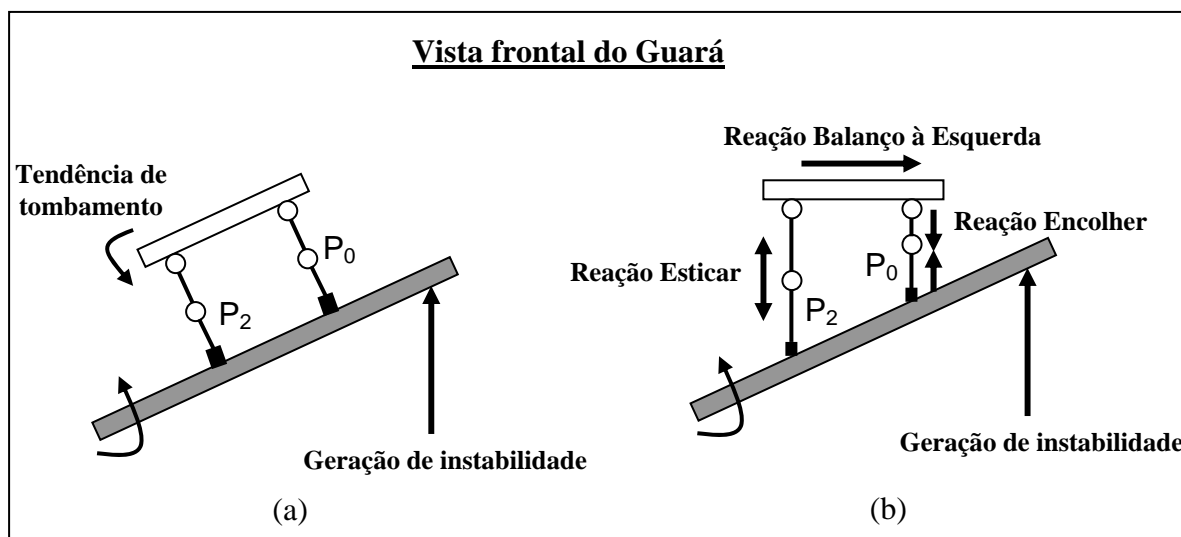


Figura 4.15 – (a) Instabilidade de equilíbrio gerada por inclinação de rolagem; (b) reflexo gerado para correção da postura da plataforma.

Na Figura 4.15 são ilustradas apenas as reações das pernas 0 e 2, em uma vista frontal do Guará. Entretanto, deve-se considerar que as pernas 1 e 3 também estão reagindo para obtenção da retomada do equilíbrio.

Para a condição de instabilidade em análise, as seguintes regras são disparadas para cada perna:

Perna 0:

*Se MERGULHO é Zero e ROLAGEM é Negativo Grande então Encolher Grande e Balanço a Esquerda Grande*

Perna 1:

*Se MERGULHO é Zero e ROLAGEM é Negativo Grande então Encolher Grande e Balanço a Esquerda Grande*

Perna 2:

*Se MERGULHO é Zero e ROLAGEM é Negativo Grande então Esticar Grande e Balanço a Esquerda Grande*

Perna 3:

*Se MERGULHO é Zero e ROLAGEM é Negativo Grande então Esticar Grande e Balanço a Esquerda Grande*

A inclinação imprópria da plataforma dispara o comportamento reflexivo que permite a recuperação da sua posição horizontal. A posição horizontal da plataforma foi adotada como o padrão correto de postura do Guará durante a locomoção.

O banco de regras de cada perna inclui regras para os estados “perna no solo” e “perna em vôo”, e as chaves de toque são utilizadas para definir a mudança entre estes dois estados, o que dispara os reflexos adequados. Para a perna que estiver em vôo durante a ocorrência de uma instabilidade de equilíbrio, o reflexo imediato é esticar até que a pata toque a superfície de locomoção.

Definida a reação necessária para cada perna (tipo e intensidade), o algoritmo de controle calcula as variações dos graus de liberdade, sendo estas um percentual da faixa disponível entre a posição atual de cada junta e os limites cinemáticos pré-estabelecidos.

As regras comportamentais estão sincronizadas para cada condição de instabilidade de equilíbrio, de modo que as reações de cada perna posicionem o robô em uma postura com margem de estabilidade, para equilíbrio da plataforma.

O método de inferência ao banco de regras utilizado é denominado Método de Mandani, também conhecido como método Máx-Mín, por utilizar estes operadores nas funções de implicação e agregação das regras (Kulitz, 2004). Este método é indicado na bibliografia pesquisada como sendo muito utilizado em sistemas para os quais a quantificação do comportamento (parâmetros, descrição numérica das relações físicas) é restrita ou não desejável, principalmente pelo custo computacional necessário ao processamento de relações matemáticas não-lineares (Mendel, 1995).

Após a inferência ao banco de regras comportamentais, torna-se necessário mapear o resultado obtido sobre o universo nebuloso de saída em valores não-nebulosos de sinal de controle. Para obtenção deste valor do sinal de controle (saída do processo de inferência), é utilizado o método do Centro de Área sobre os conjuntos nebulosos de saída.

O método do Centro de Área é apontado como um dos mais utilizados na aplicação a sistemas de controle em tempo real, em função de seu baixo custo computacional (Mendel, 1995). A Equação 4.1 define a obtenção do valor final de controle, pelo uso do método do Centro de Área, pelo qual

$$R_s = \left( \frac{\sum \mu_R(w_i) \cdot w_i}{\sum \mu_R(w_i)} \right) \quad (4.1)$$

onde:

$R_s$  – Reação de saída, referência para os atuadores;

$\mu_R(w_i)$  - Valor de pertinência da reação no universo nebuloso sobre o i-ésimo conjunto nebuloso de saída;

$w_i$  – Valor suporte do i-ésimo conjunto nebuloso da variável na qual a função de pertinência atinge o valor  $\mu_Z(w_i)$ ;

$\Sigma$  - Este somatório é processado sobre todos os conjuntos nebulosos de saída.

Na aplicação do método do Centro de Área, as funções de pertinência da saída são limitadas em altura pelo grau de pertinência correspondente à reação, obtido da inferência às regras. Assim, define-se como valor suporte o valor médio das interseções da função de pertinência com o grau de pertinência.

A geração dos reflexos de estabilidade encerra a abordagem da estratégia de controle desenvolvida para a locomoção do Guará. Esta arquitetura de controle viabiliza a execução das ações atribuídas ao robô (locomoção em trajetórias retilíneas e curvilíneas, e reação ao desequilíbrio), o que foi comprovado experimentalmente com resultados apresentados no Capítulo 5 desta tese.

Com base na descrição da arquitetura implementada, pode-se realizar uma análise crítica das características desta solução como: a contribuição à geração de reflexos de estabilidade para robôs móveis quadrúpedes, as restrições inerentes e a viabilidade (flexibilidade) de inclusão de outros recursos.

#### 4.4 ANÁLISE DA SOLUÇÃO PROPOSTA

A solução proposta para a geração de reflexos de estabilidade do Guará contribui para o esforço de adaptação e interação do robô com o ambiente de navegação, permitindo reação a estímulos externos e evidenciando importantes características como:

1. a extração de informações obtidas de um acelerômetro, com o condicionamento adequado ao disparo de reflexos de estabilidade, e atenuação das interferências comuns ao uso de acelerômetros (presença de ruídos, acúmulo de erro) em uma solução de reduzido custo computacional;
2. a realimentação do estado de apoio sobre o plano de locomoção e a ocorrência de colisão das patas com algum obstáculo, a partir da análise de estado das micro-chaves de contato presentes em cada pata, sendo esta informação simplificada e essencial à análise de disparo dos reflexos de estabilidade;
3. a independência em relação ao processamento de modelos matemáticos (incluindo relações não-lineares) para a definição dos reflexos, com uso de conjuntos nebulosos, facilitando a sintonia do gerador de reflexos, em resposta às condições de instabilidade pesquisadas;
4. o processamento hierarquizado, que permite, por interação dos níveis supervisor e coordenador da arquitetura de controle, a definição de reações em tempo real às instabilidades de equilíbrio e consequente controle supervisionado para recuperação de postura.

A respeito destas quatro características evidenciadas, pode-se afirmar que o uso do acelerômetro é adequado ao disparo de reflexos de estabilidade para as condições impostas neste projeto. A não obrigatoriedade de processamento por cálculo das grandezas monitoradas (grau de aceleração de deslocamentos do corpo e grau de inclinação) define, nesta aplicação, bom nível de imunidade dos resultados às influências da sensibilidade do acelerômetro (ruídos de medição), e erros cumulativos (*drift*).

Desta forma, a aplicação do acelerômetro neste projeto resulta em uma solução de reduzido custo computacional e reduzido investimento para sensoriamento.

Complementando a aplicação do acelerômetro, as chaves de contato utilizadas nas patas do Guará fornecem informação essencial (o estado de apoio do robô) para a geração dos reflexos de estabilidade, mantendo baixo custo computacional para processamento do estado de apoio e também baixo custo de instalação física. Entretanto, não se processa a carga atribuída a cada perna, o que poderia ser obtido através de células de carga, para uma equalização dos esforços de cada perna com a obtenção da postura de equilíbrio.

O uso de controladores nebulosos para a geração dos reflexos fecha a malha de controle da estabilidade de equilíbrio, com a contribuição de tornar a solução proposta independente da análise numérica cinemática ou dinâmica, para obtenção dos comportamentos reflexivos. Esta contribuição complementa o sensoramento com acelerômetro no sentido de reduzir o custo computacional, e permite flexibilidade de adaptação das ações de controle às condições de instabilidade de equilíbrio, pelo ajuste dos conjuntos nebulosos de entrada e saída.

Também é importante ressaltar que as características de processamento do controle nebuloso e a estratégia de geração dos reflexos, no nível coordenador de controle, favorecem a velocidade de reação do Guará às instabilidades de equilíbrio. Esta solução integra a redução da complexidade computacional e a independência da geração de reflexos em relação ao nível supervisor de controle.

A inclusão de reflexos de estabilidade, processados pelos níveis inferiores de controle, em uma arquitetura de controle hierárquica para um robô quadrúpede se confirma neste projeto como uma estratégia válida. Esta estratégia integra ações de camadas de controle viabilizando a interação (reatividade) do robô com o ambiente de navegação, na ausência do processamento de um modelo deste ambiente (níveis coordenador e atuador de controle), o controle de coordenação dos movimentos para execução de uma andadura, a recuperação de postura após a execução de reflexos e também a possibilidade de planejamento de tarefas no nível supervisor de controle (nível supervisor de controle).

Vale registrar que a arquitetura proposta não é fechada, e possibilita a inserção de novos processos que contribuam para a interação do Guará com os ambientes de navegação. Um exemplo é o sistema de visão a laser em desenvolvimento (Orlandi, 2007).

Inerente à solução proposta há uma restrição que é a impossibilidade do pleno processamento de recuperação de postura para andadura, nos níveis de controle coordenador e atuador. Esta restrição é imposta pelo fato de que a solução adotada não processa relações cinemáticas nos níveis hierárquicos inferiores de controle (esta função é de responsabilidade do nível de controle supervisor).

A recuperação de postura após a execução de reflexos para retomada de equilíbrio, como condição para reinício da andadura, exige o processamento coordenado da cinemática inversa e direta sobre cada perna do Guará. Vale ressaltar que a movimentação de cada perna na tarefa de recuperação de postura, com manutenção de uma margem de estabilidade adequada, depende do movimento realizado por todas as demais três pernas.

Assim, para a solução proposta, fica estabelecido um vínculo de interação entre supervisão e coordenação de controle, para obtenção da retomada de equilíbrio (execução de reflexos) e conseguinte recuperação de postura de andadura.

Esta integração de níveis hierárquicos de controle é uma característica relevante da arquitetura proposta para o controle de robôs quadrúpedes, uma vez que o custo para implementação de reflexos de estabilidade e geração de andadura (sincronismo de movimentos entre as pernas) no nível atuador é muito mais alto que a interação com um nível supervisor de controle responsável pela locomoção.

O desempenho obtido com a estratégia proposta para a geração dos reflexos de estabilidade do Guará está registrado com resultados experimentais no Capítulo 5 desta tese. Estes resultados confirmam a validade da composição de uso do controle clássico para geração da andadura, e controle nebuloso com uso de um acelerômetro para definição de comportamentos reflexivos.

## 5 IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS

A análise do desempenho da arquitetura proposta é apresentada neste capítulo a partir da configuração de recursos utilizados, da resposta temporal às instabilidades de equilíbrio em estudo, e do comportamento obtido para o robô com a execução dos reflexos implementados.

A divisão dos processos realizados por cada elemento processador da arquitetura de controle é definida hierarquicamente, estando um PC (*Personal Computer*) na posição hierárquica mais alta (nível supervisor de controle), os microcontroladores 80C196KB (16 bits) na segunda camada (nível coordenador de controle) e os microcontroladores PIC16F877 (8 bits) na posição hierárquica mais baixa (nível atuador de controle). A Figuras 5.1 e 5.2 apresentam diagramas elétricos dos níveis coordenador e atuador de controle para uma perna, permitindo a visualização dos recursos disponíveis e a inter-relação entre estes níveis de controle.

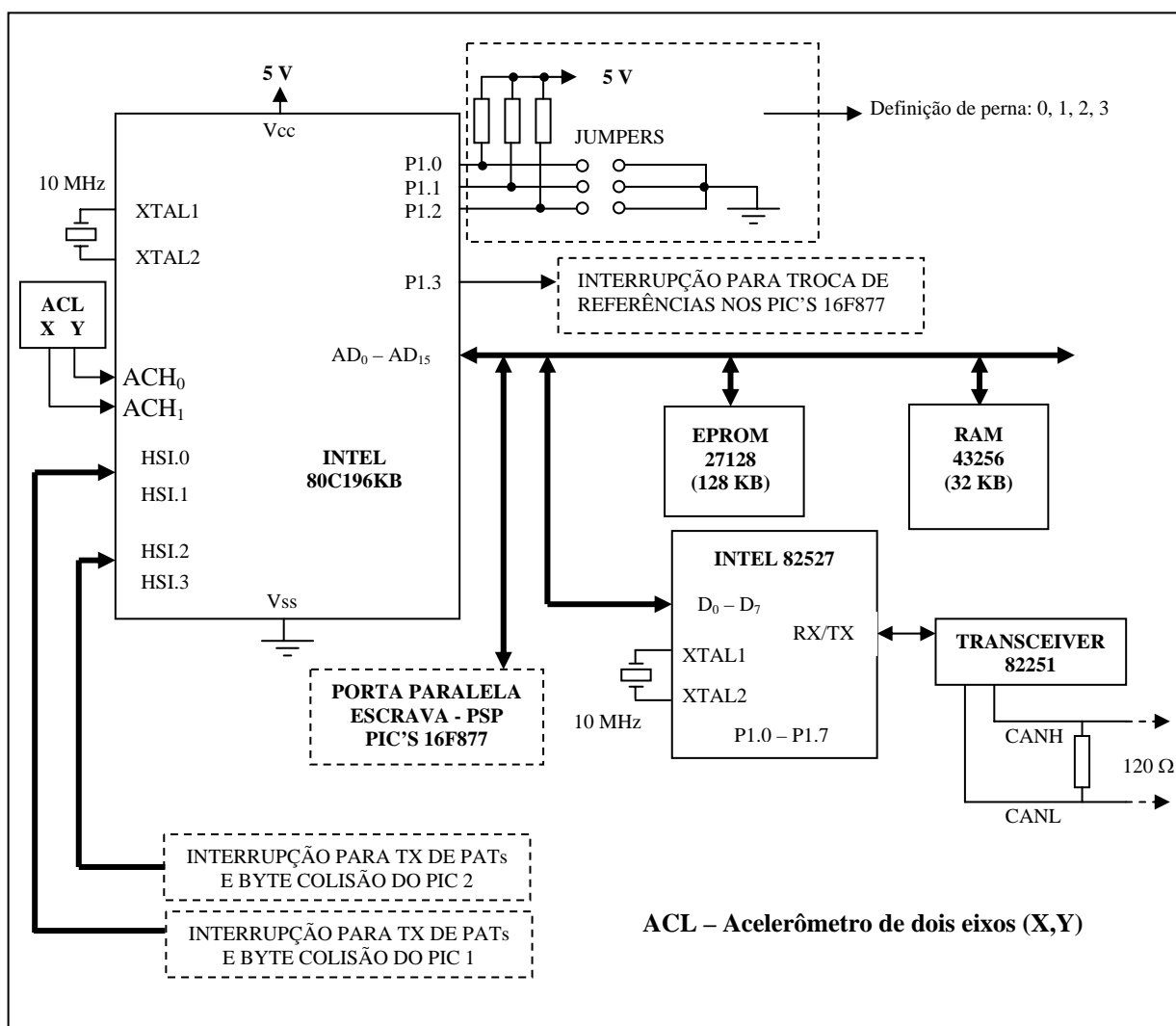


Figura 5.1 - Diagrama elétrico do nível coordenador de controle de uma perna do Guará.

A recepção dos dados gerados no nível supervisor de controle é feita por meio da rede CAN, e o destino destes dados depende de uma identificação (endereço destino) para cada mensagem gerada, sendo estes endereços distintos para cada perna do robô, razão pela qual



foram utilizados os *bits* 0, 1 e 2 da porta 1 do microcontrolador INTEL 80C196KB para definir a identificação de cada perna, como mostra a Figura 5.1

Para a comunicação entre o nível coordenador de controle e o nível atuador o microcontrolador INTEL 80C196KB endereça como dispositivo de entrada e saída de dados dois PICs 16F877 microcontroladores de 8 bits da MICROCHIP, sendo utilizada a porta paralela escrava destes PIC's (porta D) como canal de comunicação. Também pode-se observar que a devolução das posições atuais e estado das chaves de toque dos PICs para o 80C196KB é realizada por disparo de interrupções de modo a priorizar este processo.

Vale ainda ressaltar o monitoramento do estado de equilíbrio realizado com uso do acelerômetro, e também processado no nível coordenador de controle.

A Figura 5.2 complementa a estrutura do hardware de controle de uma perna do Guará explicitando os recursos do nível atuador de controle. Pode-se observar que o nível atuador de controle executa o acionamento das juntas (moto-redutores cc), monitora a posição atual das mesmas, com uso de potenciômetros, e monitora o estado de apoio da pata por meio das chaves de toque.

De acordo com o estado de apoio observado no nível atuador de controle é executado o reflexo imediato de parar no movimento das pernas.

Com base nesta estrutura, discute-se a validade da arquitetura de controle proposta, sua influência e contribuição ao controle de robôs quadrúpedes, bem como suas limitações e as possibilidades de continuidade desta pesquisa.

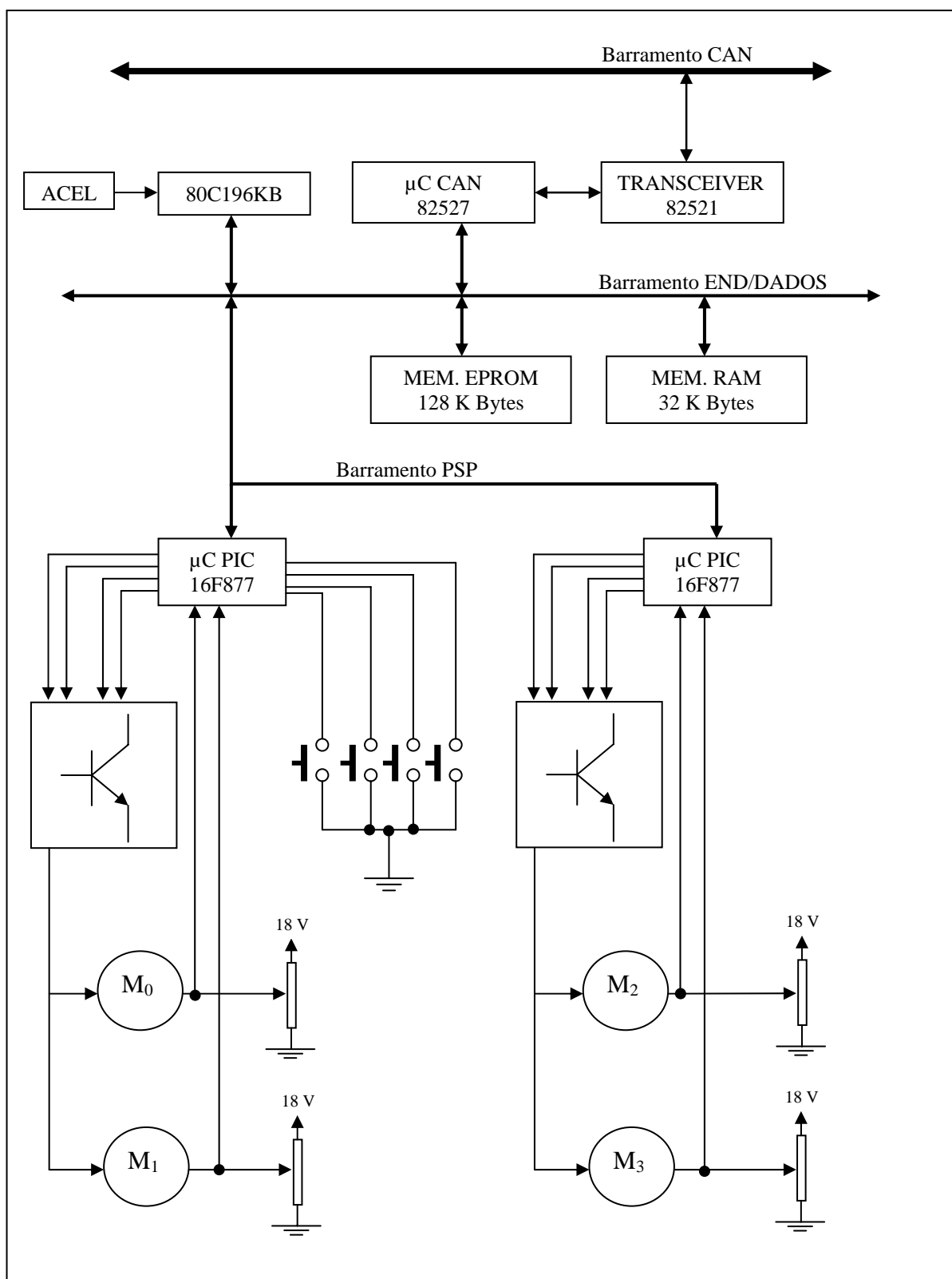


Figura 5.2 – Diagrama elétrico do hardware de controle de uma perna.

## 5.1 DEFINIÇÃO DOS IDENTIFICADORES DAS MENSAGENS CAN

A definição dos identificadores das mensagens foi estabelecida de modo a garantir que as mensagens referentes às informações de desequilíbrio ou colisão apresentem as mais altas prioridades de comunicação. Para as demais mensagens necessárias à locomoção do Guará foram definidas prioridades de acordo com a aplicabilidade da mensagem na execução dos movimentos, bem como estabelecida uma ordenação na sequência de resposta da realimentação de posição de cada junta das pernas.

Os valores atribuídos aos identificadores de cada objeto de mensagem utilizados na rede estão contidos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Tabela dos identificadores das mensagens CAN.

OBJ	PC		PERNA 0		PERNA 1		PERNA 2		PERNA 3	
	Função	Ident.	Função	Ident.	Função	Ident.	Função	Ident.	Função	Ident.
1	TX: PRMS, GNHS, SP, EXE, LIM_J, LIM_F	0xXX00	TX COL	0x3020	TX COL	0x3040	TX COL	0x3080	TX COL	0x30C0
2	RX ACK 0	0x7120	TX PAT	0x8100	TX PAT	0x8400	TX PAT	0x8700	TX PAT	0x8A00
3	RX ACK 1	0x7140	TX ACK	0x7120	TX ACK	0x7140	TX ACK	0x7180	TX ACK	0x71C0
4	RX ACK 2	0x7180	TX ACEL	0x3500						
5	RX ACK 3	0x71C0	RX LIM_J	0XA100	RX LIM_J	0XA400	RX LIM_J	0XA700	RX LIM_J	0XAA00
6	RX COL 0	0x3020	RX LIM_F	0XC100	RX LIM_F	0XC400	RX LIM_F	0XC700	RX LIM_F	0XCA00
7	RX COL 1	0x3040								
8	RX COL 2	0x3080								
9	RX COL 3	0x30C0	RX PRM	0xF100	RX PRM	0xF100	RX PRM	0xF100	RX PRM	0xF100
10	RX PAT0	0x8100	RX GNHS	0xD100	RX GNHS	0xD100	RX GNHS	0xD100	RX GNHS	0xD100
11	RX PAT1	0x8400	RX SP	0x4100	RX SP	0x4400	RX SP	0x4700	RX SP	0x4A00
12	RX PAT2	0x8700	RX COL1	0x3040	RX COL0	0x3020	RX COL0	0x3020	RX COL0	0x3020
13	RX PAT3	0x8A00	RX COL2	0x3080	RX COL2	0x3080	RX COL1	0x3040	RX COL1	0x3040
14			RX COL3	0x30C0	RX COL3	0x30C0	RX COL3	0x30C0	RX COL2	0x3080
15	RX ACEL	0x3500	RX EXE	0x7000	RX EXE	0x7000	RX EXE	0x7000	RX EXE	0x7000

Na Tabela 5.1, são utilizadas as seguintes abreviações:

- PRMS: Parâmetros de configuração dos controladores PID (período de amostragem, quantidade de períodos de amostragem para obtenção de uma posição atual).
- GNHS: Ganhos dos controladores PID de cada junta das pernas.
- SP: *Set Point*, ou referência de posição de cada junta das pernas.
- EXE: Comando “Executar”, que define a troca das referências de posição para cada junta de uma perna.
- ACK: *Acknowledge*, mensagem de reconhecimento de recepção correta de dados, definida por perna.

- PAT: Posição atual de cada junta, definida por perna.
- ACEL: Informação do acelerômetro de dois eixos.
- COL: Mensagem de colisão, byte colisão definido pelas chaves de contato das patas.
- LIM\_J: Limite cinemático das juntas das pernas.
- LIM\_F: Limites dos conjuntos nebulosos de entrada e saída.

Para que o objeto de mensagem 1 possa transmitir quatro mensagens distintas, é necessário que seja definida para cada mensagem um identificador. Assim sendo, o identificador expresso por 0xXX00 na Tabela 5.1, assume, em tempo de execução, os valores descritos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Mensagens transmitidas pelo objeto 1 ao nível coordenador de controle.

<b>Objeto de mensagem 1 do 82527 vinculado ao PC</b>	
<b>Mensagem</b>	<b>Identificador</b>
PRMS	0 x F100
GNHS	0 x D100
SP Perna 0	0 x 4100
SP Perna 1	0 x 4400
SP Perna 2	0 x 4700
SP Perna 3	0 x 4A00
EXE	0 x 7000
LIM_J Perna 0	0 x A100
LIM_J Perna 1	0 x A400
LIM_J Perna 2	0 x A700
LIM_J Perna 3	0 x AA00
LIM_F Perna 0	0 x C100
LIM_F Perna 1	0 x C400
LIM_F Perna 2	0 x C700
LIM_F Perna 3	0 x CA00

Com esta atribuição de identificadores a escala de prioridade das mensagens fica estabelecida conforme ilustra a Figura 5.3.

A rede CAN foi configurada para comunicação na taxa de 1Mb/s, e com a distribuição estática de prioridades adotada para as mensagens, ficou comprovada a viabilidade do controle de locomoção do Guará.

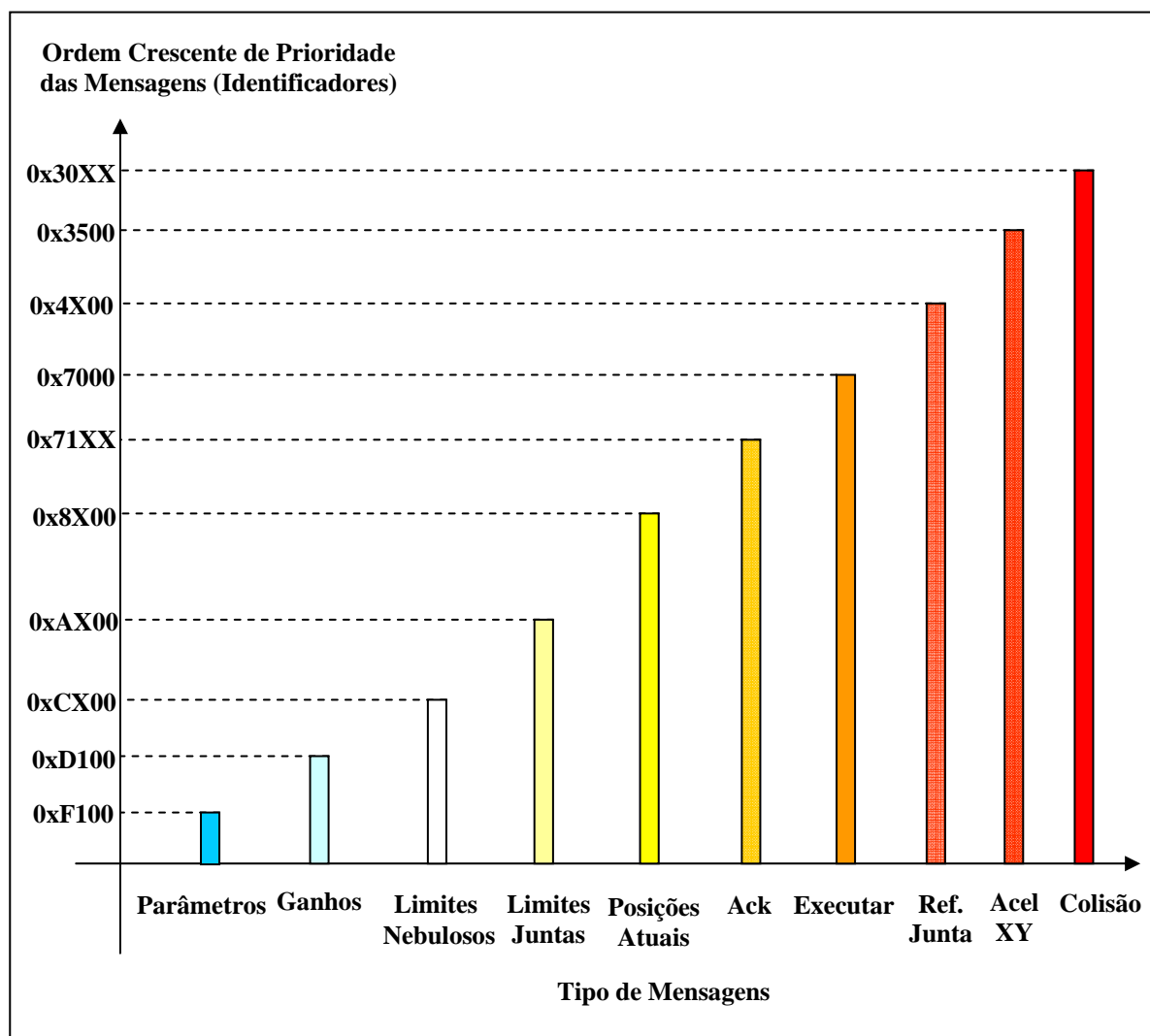


Figura 5.3 – Ordem de prioridade das mensagens utilizadas no controle do Guará.

Na Figura 5.3 pode-se observar que a prioridade das mensagens é inversamente proporcional ao valor do identificador da mensagem, isto porque o *bit* dominante em uma disputa de mensagens pelo barramento CAN é o *bit* com estado zero (nível lógico baixo).

## 5.2 O FLUXO DE MENSAGENS

Para uma visualização do tráfego de mensagens estabelecido com a estruturação lógica implementada em *hardware* e *software*, são representadas em diagramas de blocos a geração e transmissão de cada uma das mensagens processadas na arquitetura de controle para execução de passos da andadura.

A Figura 5.4 ilustra a transmissão das posições de referência desde o nível supervisor até o nível coordenador de controle, e a Figura 5.5 apresenta a distribuição das posições de referência para o nível atuador de controle. Estes processos são subsequentes, e definem, no nível atuador de controle, as próximas posições de referência a serem alcançadas em cada junta de uma perna na realização do passo. Como se pode observar na Figura 5.4, as posições

de referência são enviadas em sequência, por perna, sendo a perna “0” a primeira a receber as posições de referência e a perna “3” a última.

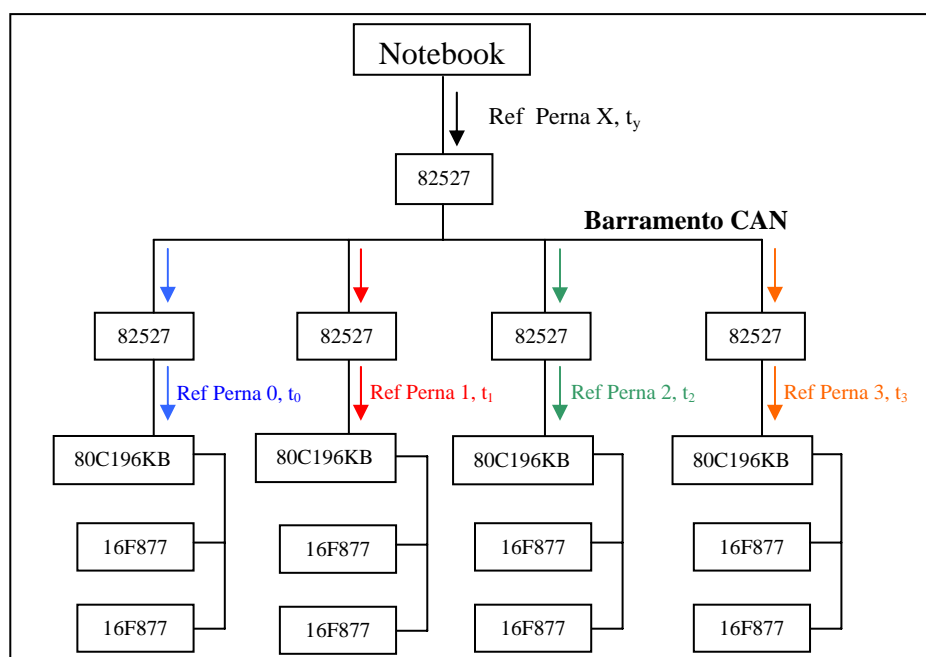


Figura 5.4 - Fluxo de transmissão de posições de referência do nível supervisor de controle para o nível coordenador.

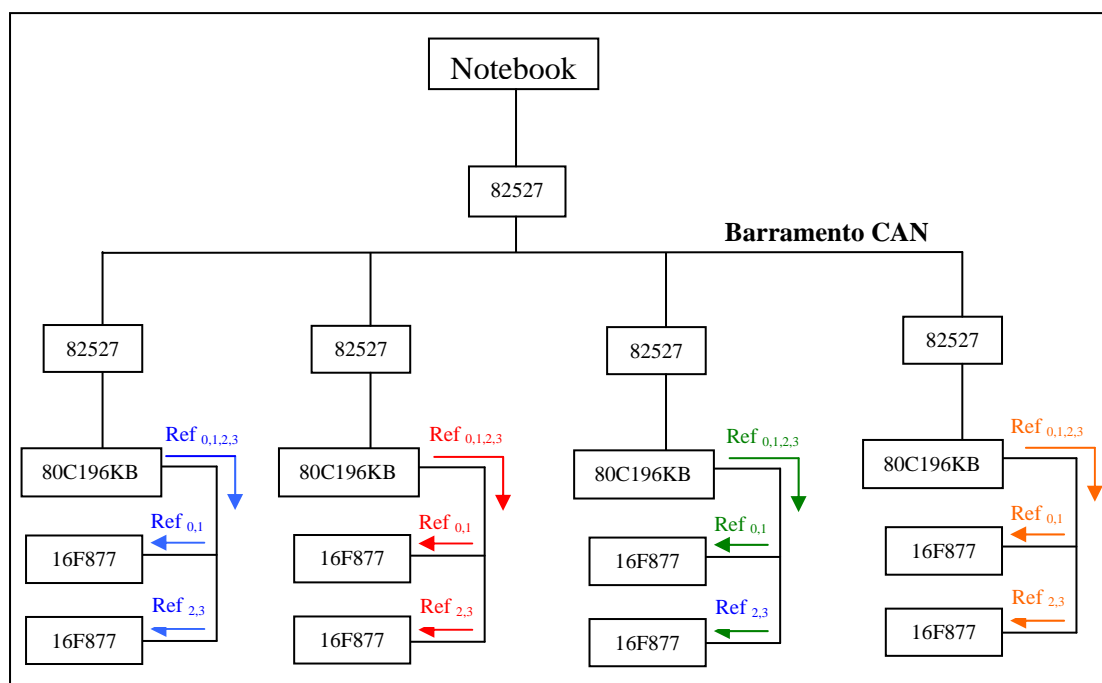


Figura 5.5 - Atualização das posições de referência enviadas do nível coordenador para o nível atuador de controle.

Para cada pacote com 4 posições de referência (4 juntas de uma perna), recebido no nível coordenador de controle, é feita a devolução de um “Acknowledgement” (reconhecimento), para informar ao nível supervisor de controle que as posições de referência

foram recebidas corretamente e enviadas aos PICs. A Figura 5.6 ilustra a devolução dos “Acknowledgements” das posições de referência.

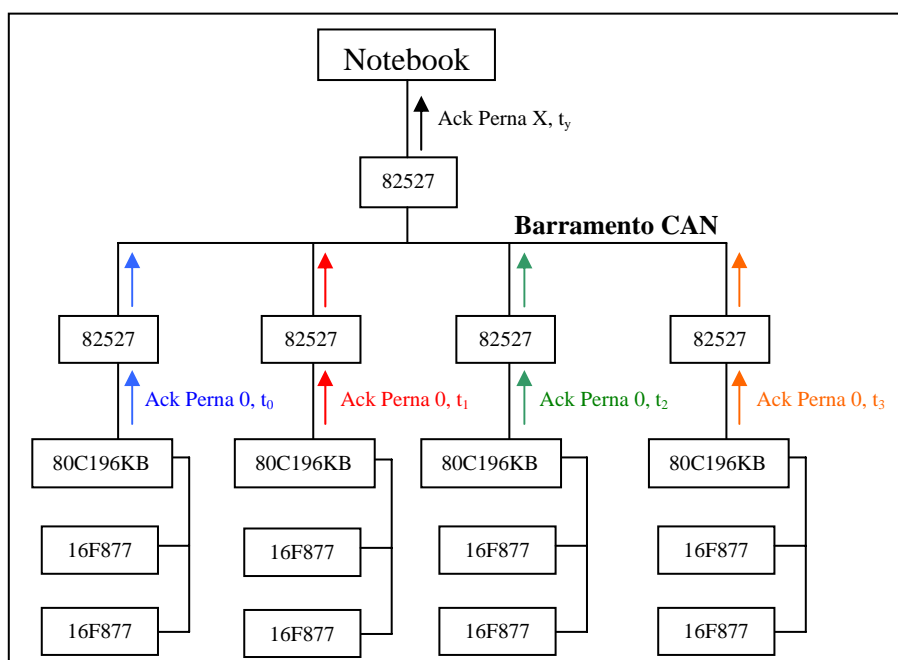


Figura 5.6 - Devolução de “Acknowledgments” referentes às posições de referência recebidas no nível coordenador de controle.

Recebidos os “Acknowledgments” de todas as pernas no nível supervisor de controle, é gerado e transmitido o comando “Executar”, que define a troca simultânea da posição de referência em todos os PIC’s (nível atuador de controle). Esta troca ocorre sincronizada com uma interrupção externa que o 80C196KB estabelece sobre os PICs da perna equivalente.

O comando “Executar”, sendo transmitido em *broadcast* para todas as pernas, sincroniza a troca das posições de referência no nível atuador de controle, garantindo assim a manutenção da diferença de fases entre os movimentos executados e, conseqüentemente, o equilíbrio do robô. A Figura 5.7 ilustra o *broadcast* do comando “Executar”.

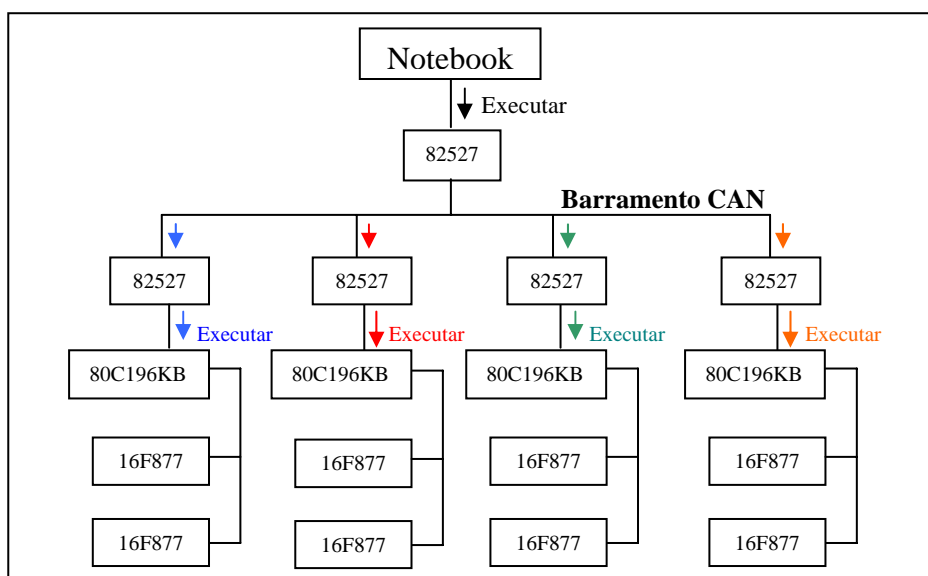


Figura 5.7 - Propagação (*broadcast*) do comando “Executar”.

Para que se complete o ciclo de controle de locomoção do Guará, é necessário que o nível supervisor de controle receba os valores das posições reais obtidas nas juntas das pernas. Assim, pode-se definir a manutenção do movimento, seja pelo envio do próximo passo seja pela correção de postura do robô em caso de constatação de algum desequilíbrio. Torna-se, então, necessária a devolução da posição real de cada junta do nível atuador de controle para o nível coordenador, com o subsequente envio destas posições reais do nível coordenador ao nível supervisor. As Figuras 5.8 (a) e (b) ilustram a devolução da posição real das juntas ao nível supervisor de controle.

A devolução das posições reais das juntas do nível coordenador de controle para o nível supervisor se estabelece por disputa no barramento CAN, sendo a ordem de prioridade decrescente da perna “0” para a perna “3”.

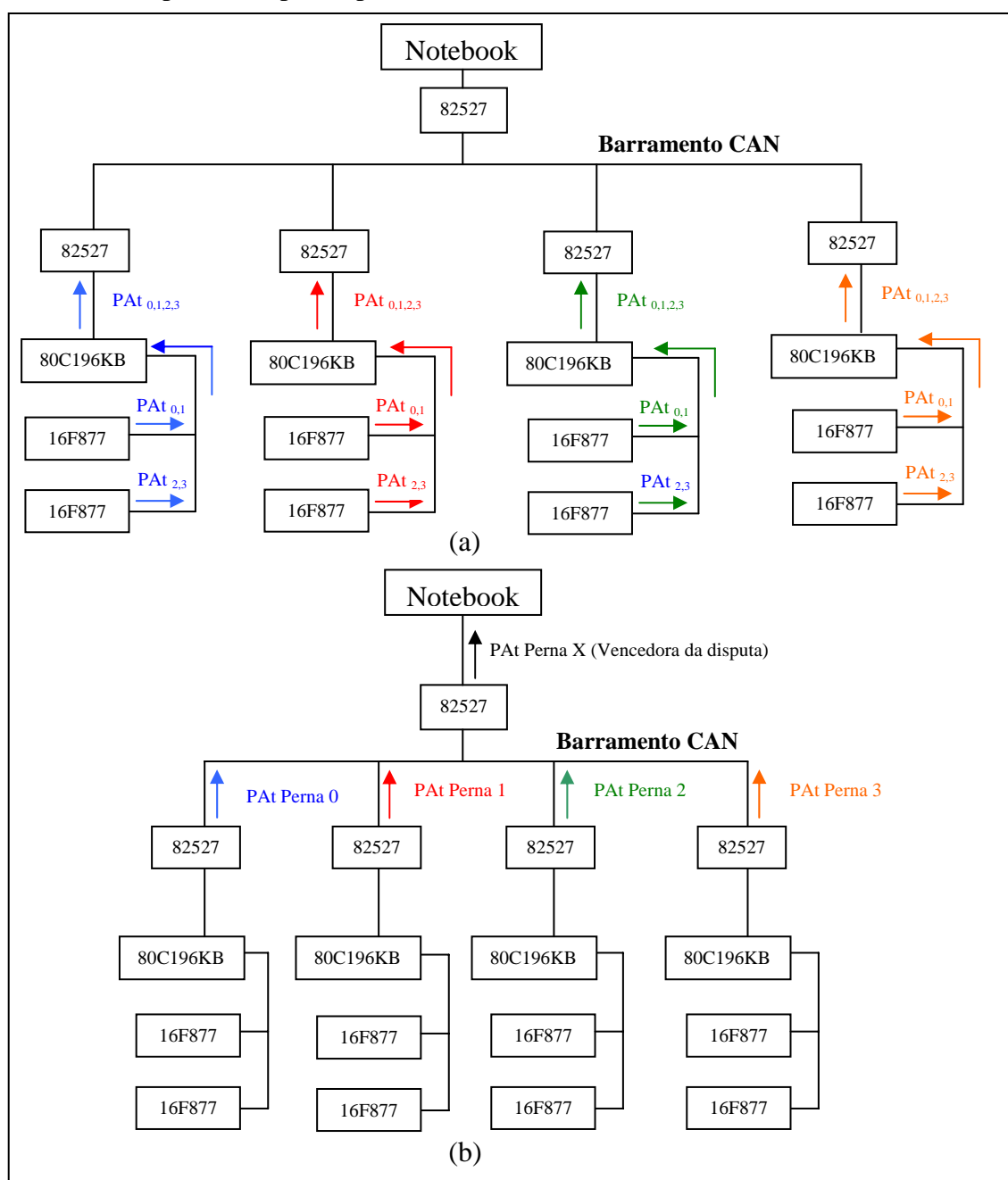


Figura 5.8 - (a) Devolução das posições reais das juntas das pernas do nível atuador de controle para o nível coordenador; (b) Devolução das posições reais das juntas das pernas do nível coordenador de controle para o nível supervisor.



Encerrado o ciclo de controle, com a devolução das posições reais das juntas das pernas para o nível supervisor, o ciclo se repete com a geração de novas posições de referência para as juntas das pernas, sendo estas definidas com base no estado observado do robô, composto pelas posições reais das juntas realimentadas ao modelo cinemático. Desta forma define-se a execução da andadura.

Na ocorrência de uma colisão detectada pela pata de uma das pernas do robô, ocorre a propagação imediata do estado de colisão definido pelas micro-chaves instaladas em cada uma das quatro patas, e, conseqüentemente, a interrupção imediata do movimento das pernas. A colisão é detectada por interrupção gerada com a mudança de estado lógico sobre as vias RB4 a RB7 da porta B dos PICs, e uma rotina de tratamento destas interrupções formata e envia o estado de colisão ao 80C196KB. A ilustração deste processo é feita nas Figuras 5.9 e 5.10.

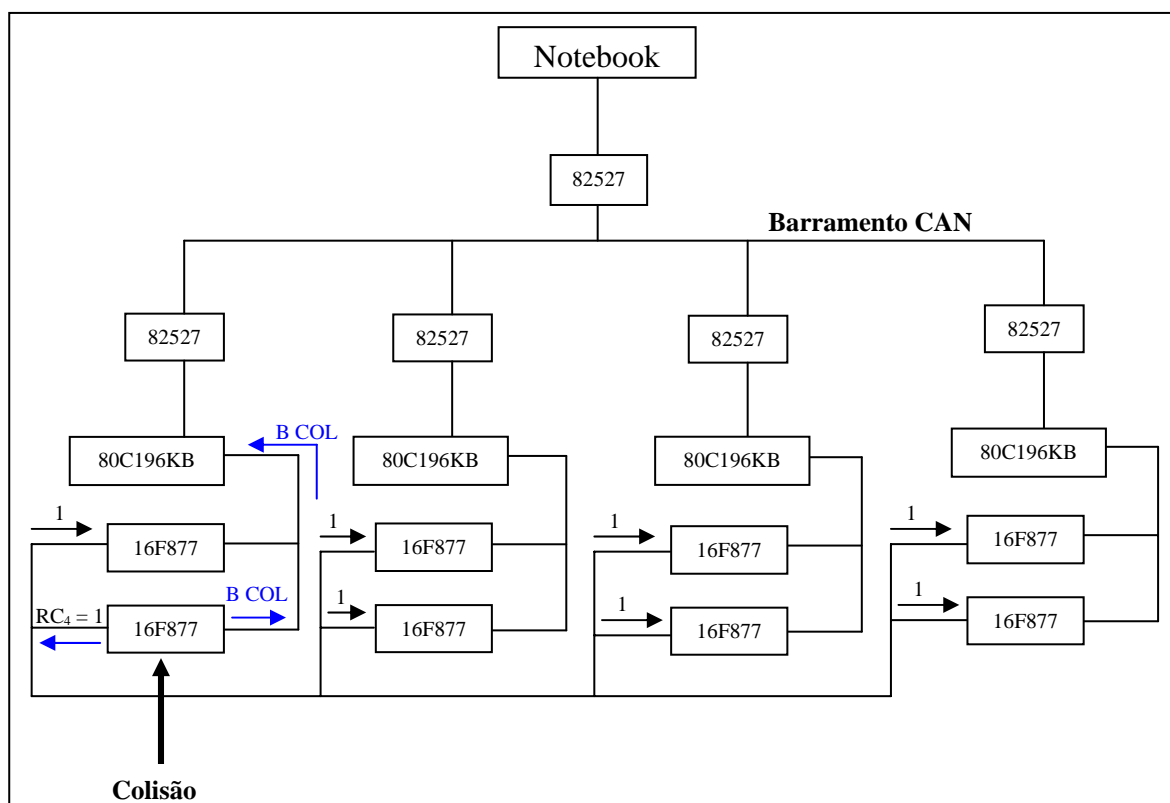


Figura 5.9 - Detecção da colisão, propagação do *flag* colisão para todos os processadores do nível atuador de controle, e propagação do *byte* “estado das chaves detectoras” ou “*byte* colisão” para o nível coordenador de controle.

Os passos do processamento para detecção de colisão são:

- 1) o PIC detector da colisão imediatamente interrompe o movimento das juntas que está controlando, e muda o nível lógico da via 4 da porta C, informando a todos os demais PICs que ocorreu uma colisão. Os demais PIC's, por sua vez, detectarão por *polling* a condição de colisão recebida, e imediatamente pararão os movimentos das juntas que controlam;
- 2) paralisados os movimentos de todas as juntas, o PIC que detectou a colisão transmite ao nível coordenador de controle ( $\mu$ Cs 80C196KB) o *byte* colisão, que é propagado para as demais pernas e para o nível supervisor de controle.

A segunda fase do processo de detecção de colisões é ilustrada na Figura 5.10.

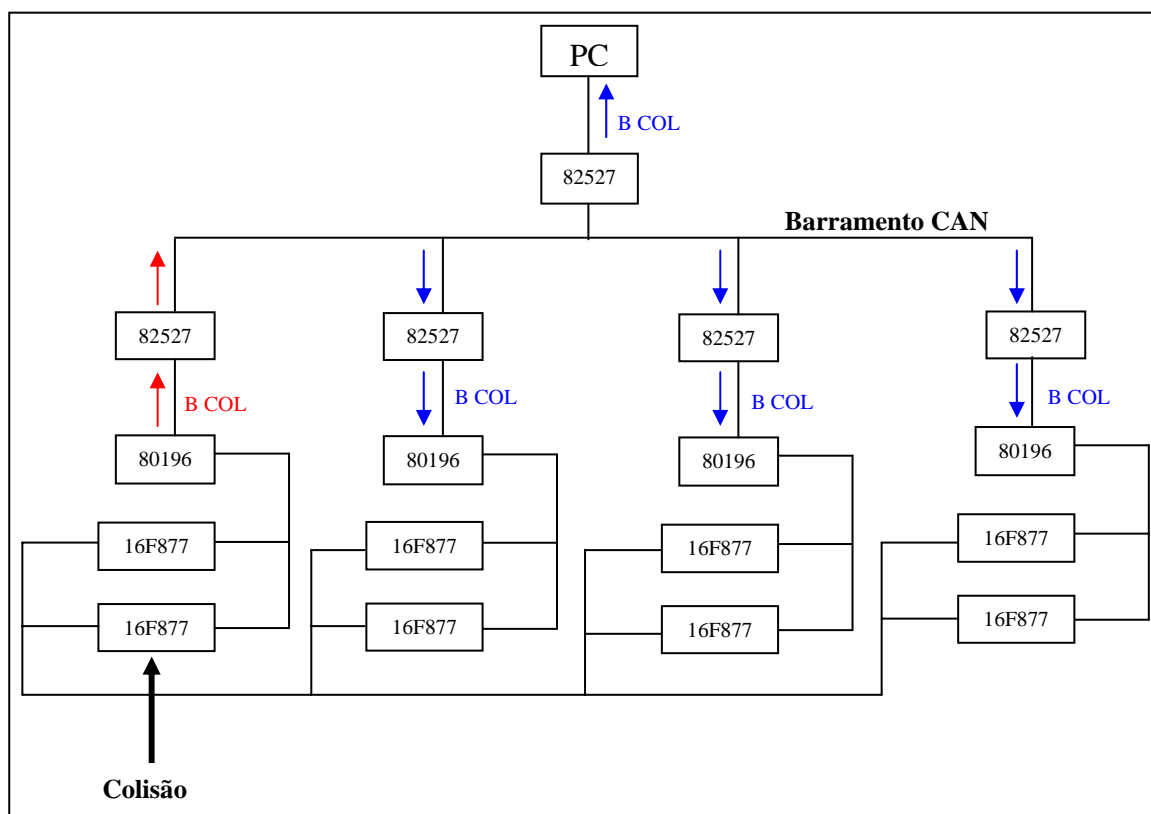


Figura 5.10 - Propagação do *byte* colisão.

As fases finais para o tratamento de colisão são:

- 1) a partir do instante que todos os controladores do nível coordenador e do nível supervisor recebem a informação do *byte* colisão, a transmissão de posições de referência para todas as juntas das quatro pernas é interrompida;
- 2) interrompidos os movimentos do robô, o nível supervisor de controle inicia o envio de posições de referência para transposição do obstáculo, sendo que estes valores são alterados com a inclusão do *bit* colisão que indica referência para transposição de obstáculo.

Vale ainda ressaltar que o processo de detecção descrito é válido para todas as quatro pernas do robô. Na ocorrência de colisão em mais de uma perna, a transmissão dos *bytes* colisão se dará por disputa de arbitração no barramento, sendo que a mensagem da perna “0” é a de maior prioridade e a da perna “3” é a de menor prioridade.

Para finalizar o tratamento do fluxo de mensagens no Guará, é importante descrever o processamento das mensagens geradas a partir do sensoramento com acelerômetro para o controle da estabilidade de equilíbrio. A origem deste fluxo de mensagens está no processo de medição das acelerações geradas por impactos ou inclinações de mergulho e rolagem, que determinam sobre os conjuntos nebulosos utilizados a condição de desequilíbrio. Os valores obtidos do acelerômetro de dois eixos são simultaneamente transmitidos a todos os microcontroladores 80C196KB, e também transmitidos ao nível supervisor de controle pelo microcontrolador 80C196KB da perna “0” (isto viabiliza a obtenção de perfis gráficos de

aceleração, úteis na análise qualitativa e implementação dos reflexos). Esta primeira etapa na geração de mensagens de equilíbrio está ilustrada na Figura 5.11.

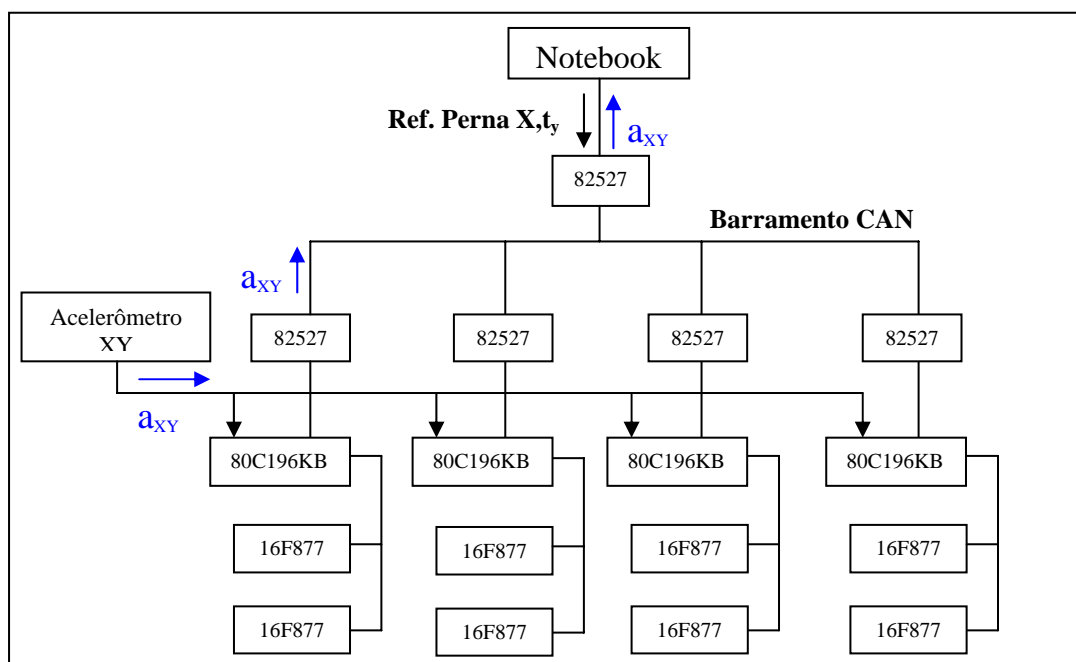


Figura 5.11 - Propagação dos valores obtidos do acelerômetro.

Ocorrendo desequilíbrio, seja por instabilidade nos movimentos da andadura ou por distúrbios (impactos) incidentes sobre o Guará, os valores obtidos do acelerômetro serão classificados pelos conjuntos nebulosos dos controladores de cada perna, para a definição do estado de desequilíbrio. Confirmada a condição de desequilíbrio, gera-se uma mensagem no  $\mu C$  80C196KB da perna “0”, enviada ao nível supervisor de controle com o objetivo de interromper a definição de novas referências, e então o nível supervisor assume a função de observação de estado.

Para corrigir a instabilidade de equilíbrio inicia-se o processamento da inferência sobre regras nebulosas que estabelecem os movimentos de reflexo a serem executados (direção, sentido, intensidade).

Durante toda a correção de postura para retomada da estabilidade de equilíbrio, o nível supervisor de controle recebe o estado corrente de postura do robô (posições atuais de juntas e valores do acelerômetro). Encerrada a reação e alcançada uma postura equilibrada para o robô, é enviada ao nível supervisor de controle uma mensagem para liberação de recuperação da postura inicial de locomoção. A Figura 5.11 ilustra o fluxo de mensagens para cada etapa do processo de reação para recuperação de equilíbrio.

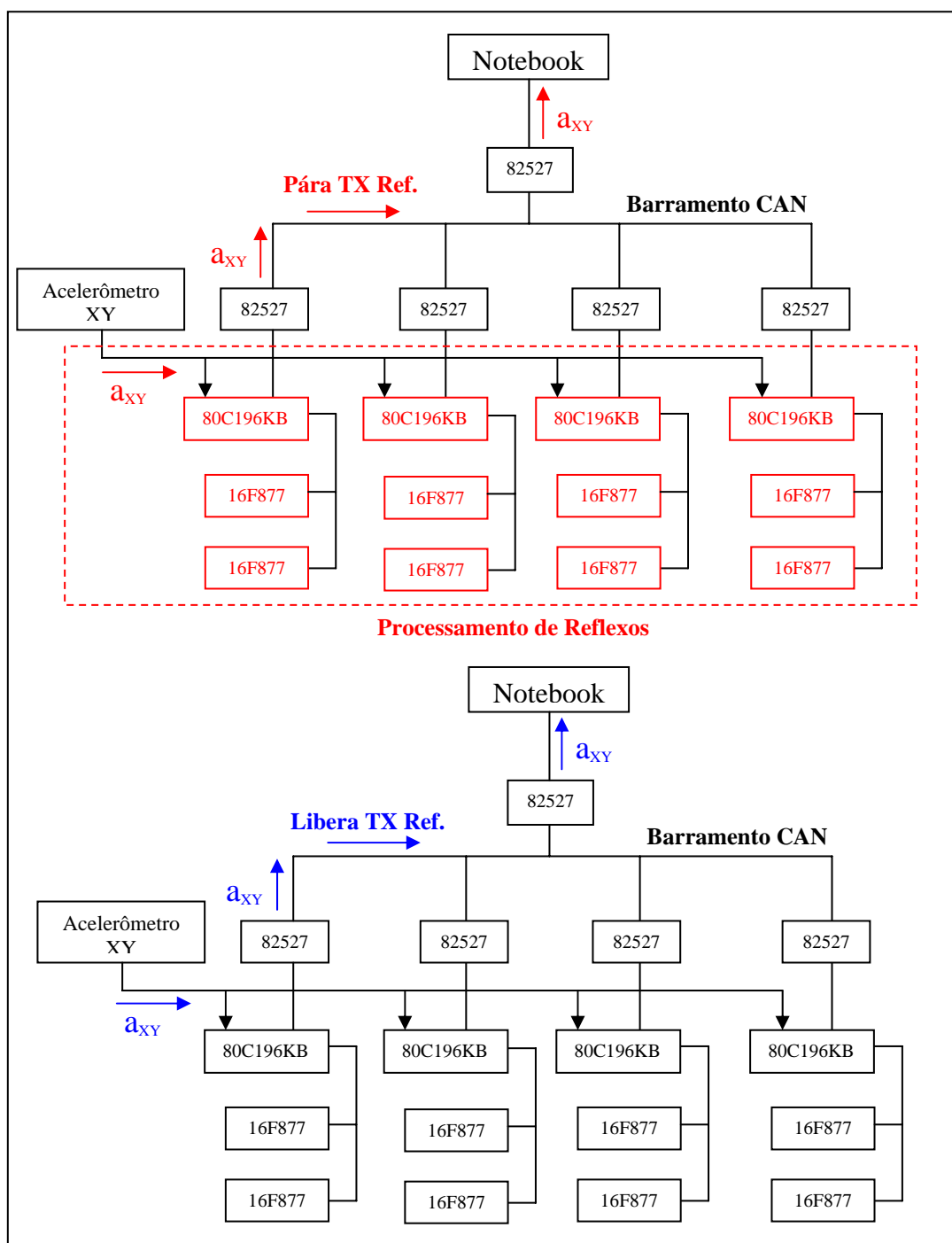


Figura 5.12 - (a) Início do processamento dos reflexos; (b) Finalização do processamento dos reflexos.

Vale ainda ressaltar que todas as informações recebidas e transmitidas do nível coordenador para o atuador estão empacotadas de acordo com um protocolo utilizado na comunicação entre os microcontroladores 80C196KB e os PICs. Este protocolo faz uso de um *byte* para início de transmissão (STX), um *byte* para definição do tipo da mensagem (TIP), *n bytes* para dados, um *byte* para verificação de erro de transmissão (CS) e um *byte* para finalização de mensagem (ETX).

A estruturação do *hardware* e do *software* implementados para compor a arquitetura proposta confere a ela o caráter hierárquico, uma vez que é possível, no nível supervisor de controle, planejar a locomoção do robô, através da observação do estado atual, do

processamento do modelo cinemático para definição das referências do estado futuro a ser alcançado e utilizando-se uma comunicação multi-mestre (CAN) com todos os nós do nível coordenador de controle (microcontrolador 80C196KB). A gerência da distribuição de referências no nível coordenador, a realimentação de estado ao nível supervisor e a possibilidade de execução de comportamentos reativos para tratamento de condições críticas na locomoção (colisão e desequilíbrio), estabelece uma descentralização do controle, o que garante ao nível supervisor disponibilidade de tempo suficiente para que seja processada a geração de uma andadura e tarefas adicionais relevantes à locomoção do robô (exemplo, sistema de visão).

Assim sendo, fica estabelecida a capacidade de expansibilidade funcional desta arquitetura, o que enriquece o conjunto de tarefas viáveis ao Guará.

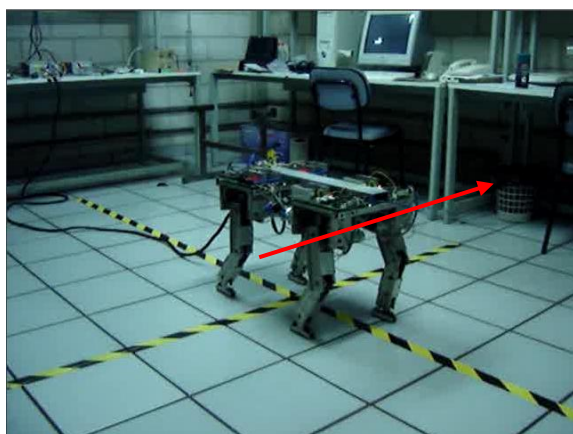
Em relação ao nível atuador de controle, a influência positiva da subordinação ao nível coordenador é a possibilidade de rápida reação a instabilidades, com geração de movimentos corretivos sem, necessariamente, a intervenção sobre processos do nível supervisor de controle. No nível atuador de controle está implementado o processamento de reação mais imediato, que garante a manutenção da integridade física do robô, como a interrupção dos movimentos na detecção de colisão, além da realimentação ao nível coordenador de controle com a informação do estado atual das pernas, o que permite a previsão de instabilidades.

Uma outra característica muito relevante inerente à arquitetura de controle proposta é a modularidade obtida com o projeto do *hardware*, sendo que este projeto permite a inclusão de mais nós no nível coordenador (rede CAN) e também mais unidades processadoras no nível atuador (barramento PSP dos PIC's). Ou seja, tanto é possível mudar a configuração, em graus de liberdade do robô, como utilizar esta arquitetura em aplicações diversificadas.

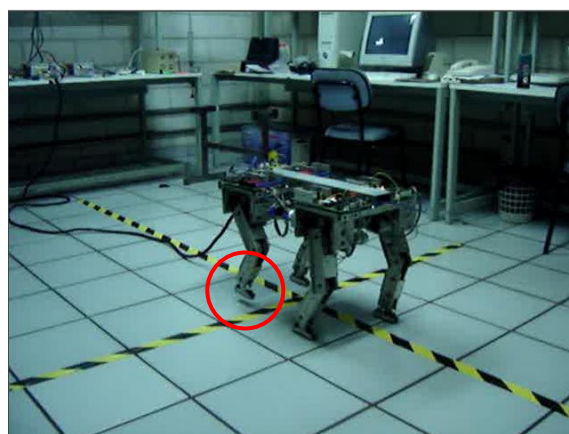
De acordo com a descrição dos processos de controle do Guará, conclui-se que a comunicação realizada via rede CAN é um segmento relevante da arquitetura de controle proposta. Assim, faz-se necessária, a apresentação das características gerais e a configuração utilizada nesta rede CAN.

### 5.3 TESTES EXPERIMENTAIS

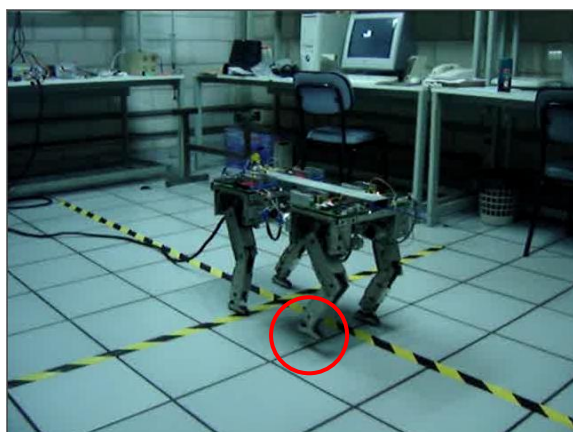
O desempenho satisfatório do controle de locomoção está comprovado com a realização de trajetórias retilíneas e curvilíneas, conforme ilustram as Figuras 5.13 e 5.14.



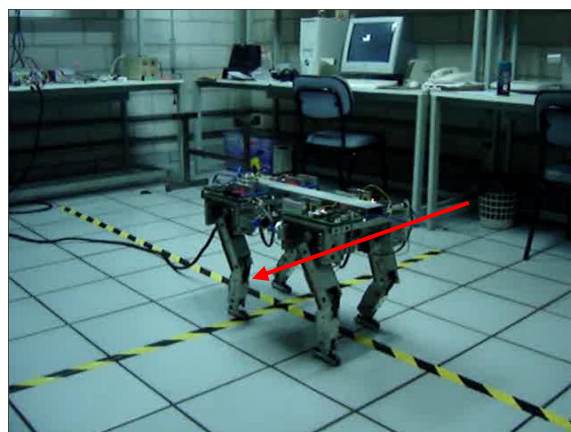
(a)



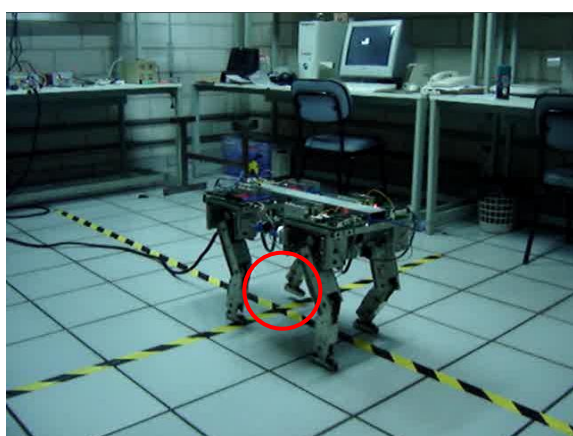
(b)



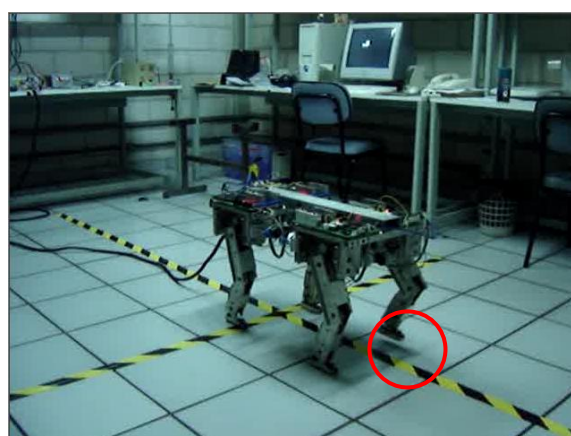
(c)



(d)



(e)



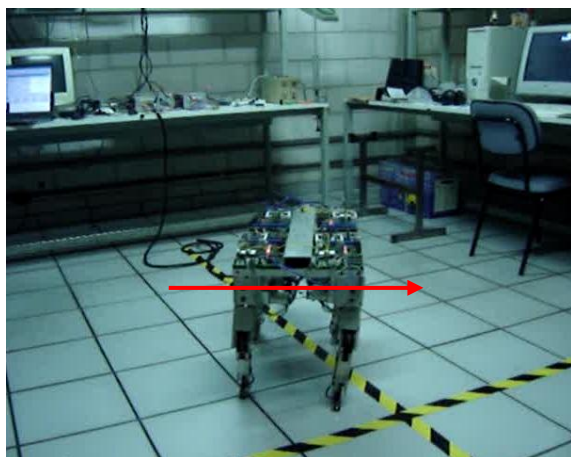
(f)

Figura 5.13 – Sequência de movimentos da andadura, para locomoção em trajetória retilínea. (a) Balanço transversal à esquerda para vôo das pernas 2 e 3; (b) Vôo da perna 3; (c) Vôo da perna 2; (d) Balanço transversal à direita para vôo das pernas 1 e 0; (e) Vôo da perna 1; (f) Vôo da perna 0.

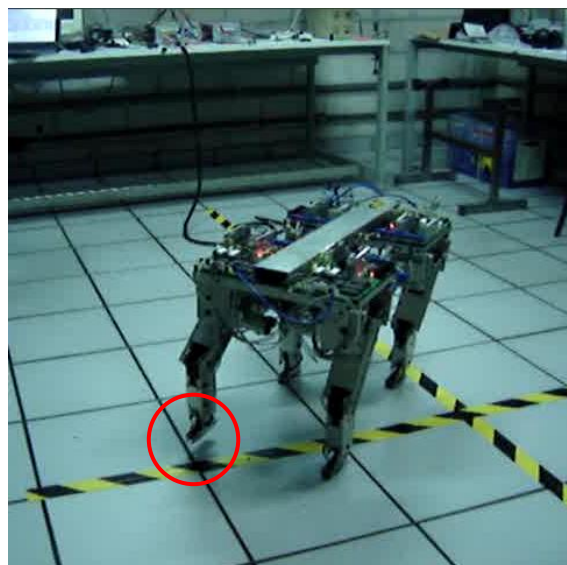
O teste de locomoção ilustrado na Figura 5.13 comprova a eficiência da estratégia de uso do balanço transversal para aumento da margem de estabilidade, permitindo o vôo das pernas para avanço na trajetória retilínea, com a manutenção do equilíbrio.

Um teste similar foi realizado para trajetória em curvatura e confirmou-se a manutenção do equilíbrio também para estes movimentos. A Figura 5.14 ilustra fases deste teste.

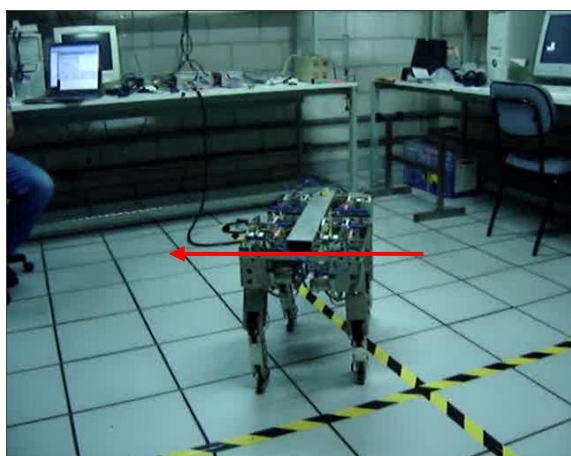




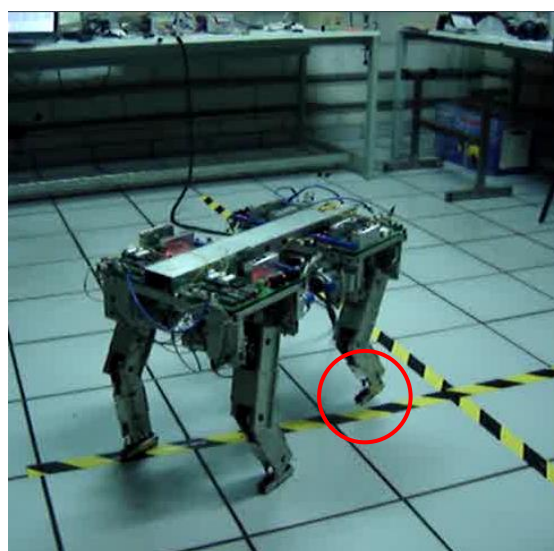
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.14 - Sequência de movimentos da andadura, para locomoção em trajetória curvilínea; (a) Balanço transversal à esquerda para vôo das pernas 2 e 3; (b) Vôo da perna 2; (c) Balanço transversal à direita para vôo das pernas 0 e 1; (d) Vôo da perna 1.

#### 5.4 RESPOSTAS DO ACELERÔMETRO AOS MOVIMENTOS DO GUARÁ

Para tornar possível a implementação dos reflexos de estabilidade, é necessário que previamente se conheça o comportamento da resposta do acelerômetro às instabilidades que se pretende abordar. Com base no comportamento destas repostas, pode-se definir o tipo de reação adequada à manutenção do equilíbrio, bem como calibrar a intensidade desta reação.

A Figura 5.15 estabelece a nomenclatura de referência adotada para as análises descritas a seguir, bem como a relação entre a resposta do acelerômetro e os movimentos correspondentes da plataforma do Guará.

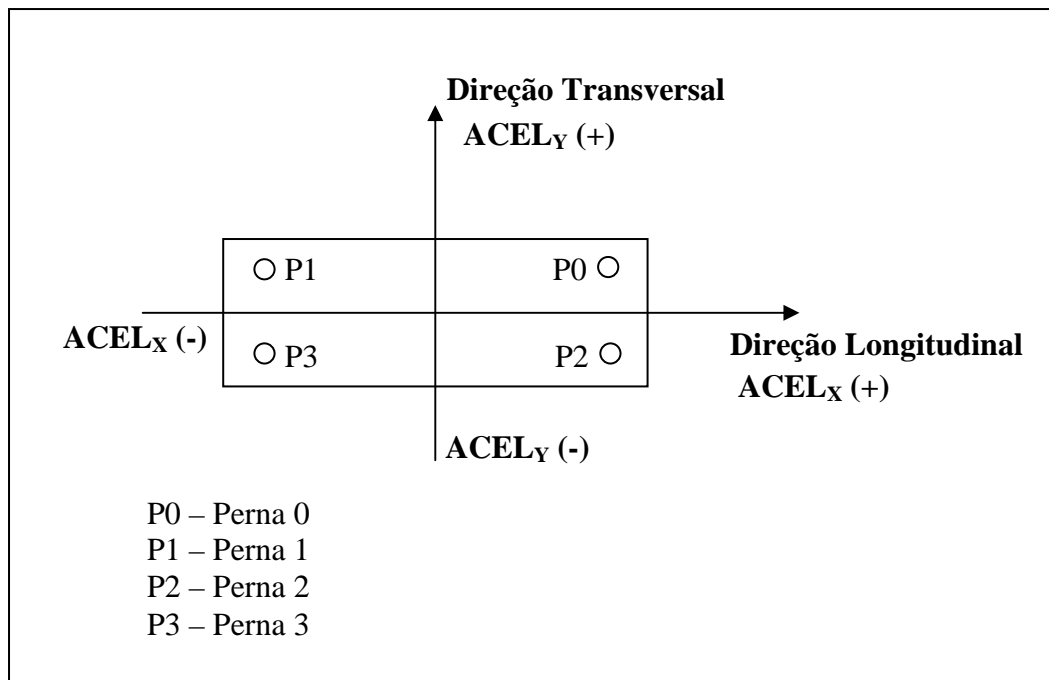


Figura 5.15 Nomenclatura de referência para os movimentos do robô e as repostas do acelerômetro.

Vale ressaltar que movimentos referenciados por respostas positivas do acelerômetro serão traduzidos pela conversão A/D à faixa de valores entre 500 e 1023, e para referências negativas os valores de saída da conversão estão entre 0 e 500 (a conversão A/D utilizada é com 10 bits). É importante lembrar que:

- inclinações na direção longitudinal são denominadas de mergulho (positivo à frente, e negativo para trás), inclinações na direção transversal são denominadas de rolagem (positiva sobre as pernas 0 e 1, e negativa sobre as pernas 2 e 3);
- avanço e recuo são deslocamentos da plataforma na direção longitudinal, sem inclinação;
- balanço transversal são deslocamentos da plataforma nesta direção, sem inclinação.

Serão apresentadas a seguir as respostas do acelerômetro aos movimentos naturais da andadura, e também as respostas aos distúrbios de instabilidade impostos sobre o Guará, com a respectiva análise da relação estímulo-resposta.



#### 5.4.1 Resposta do acelerômetro às oscilações naturais da andadura

No decorrer da andadura, todas as oscilações do movimento da plataforma do Guará são traduzidas em variações nas saídas do acelerômetro. As Figuras 5.16 e 5.17 apresentam as saídas  $ACEL_X$  e  $ACEL_Y$ , em vermelho e azul, respectivamente, em conjunto com a excursão executada pela junta 0 da perna do Guará, representada em verde.

As variações na resposta do acelerômetro tornam-se mais acentuadas nos instantes em que são executados os balanços laterais para equilíbrio do robô, nos quais ocorrem picos de variação entre 500 e 541 para  $ACEL_X$ , e 463 e 578 para  $ACEL_Y$ .

Sendo o balanço executado na direção transversal, é coerente que a variação resultante em  $ACEL_Y$  seja mais acentuada que em  $ACEL_X$ .

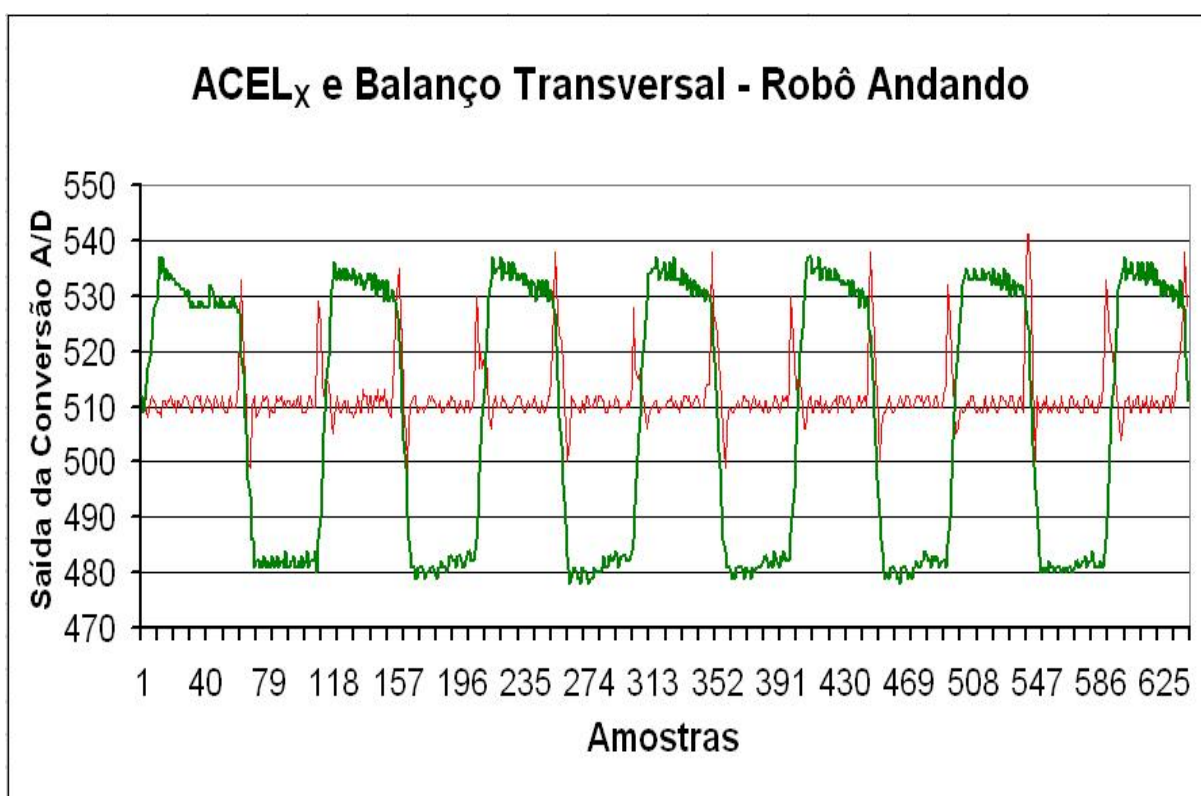


Figura 5.16 - Resposta do acelerômetro na direção longitudinal da plataforma do Guará.

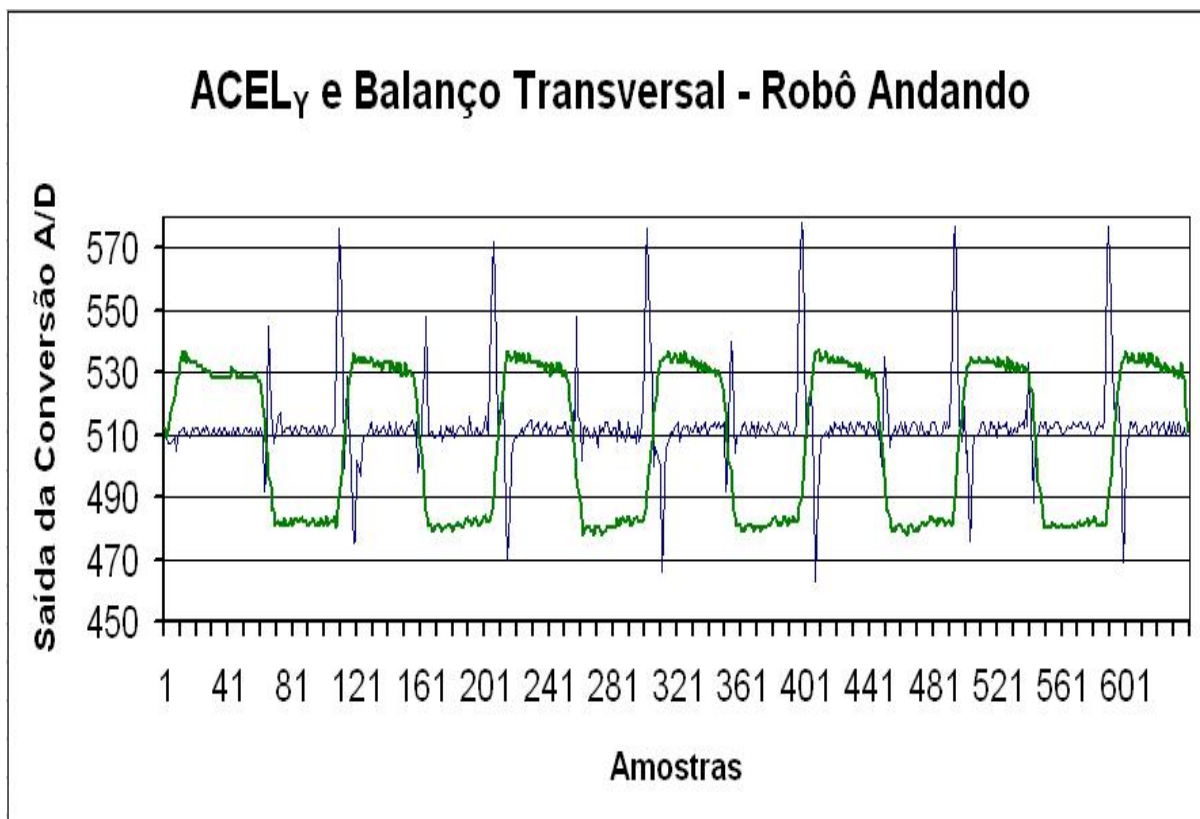


Figura 5.17 - Resposta do acelerômetro na direção transversal da plataforma do Guará.

Para facilitar a análise das respostas obtidas do acelerômetro durante a andadura, são apresentados valores característicos na Tabela 5.4. Os valores apresentados são definidos em incrementos da conversão A/D.

Tabela 5.3 - Tabela da análise de  $ACEL_X$  e  $ACEL_Y$  para execução de andadura.

<b>Características</b>	<b><math>ACEL_X</math></b>	<b><math>ACEL_Y</math></b>
Valor mínimo	499	463
Valor máximo	541	578
Média	512	513
Desvio padrão	5,4	12,3

As respostas obtidas para  $ACEL_X$  e  $ACEL_Y$  durante a execução da andadura mostram que existem faixas de oscilação destas acelerações para as quais não se deve gerar reflexos de equilíbrio, pois resultam dos movimentos naturais da andadura. Estas faixas são:

- em  $ACEL_X$  e  $ACEL_Y$ , durante o avanço da plataforma: de 509 a 513;
- em  $ACEL_X$ , durante o balanço da plataforma: de 499 a 541;

- em  $ACEL_Y$ , durante o balanço da plataforma: de 463 a 578.

Estas faixas são filtradas pelo controlador nebuloso com a função de pertinência de entrada “ZERO”. A partir desta análise de resposta do acelerômetro para a andadura normal do Guará, pode-se iniciar o estudo de implementação dos reflexos de estabilidade.

## **5.5 A INFLUÊNCIA DOS REFLEXOS SOBRE A MARGEM DE ESTABILIDADE**

Para uma comprovação prévia, ainda que teórica, sobre a correção da margem de estabilidade do robô obtida com o uso dos reflexos implementados, foram analisadas configurações definidas em CAD que ilustram os resultados esperados. Estas análises abrangeram a condição de instabilidade gerada por inclinação de mergulho e rolagem do plano de locomoção do robô.

No estudo da instabilidade por mergulho da plataforma, considerou-se uma inclinação de 10 graus imposta sobre o plano de locomoção, tendo sido obtido o resultado apresentado nas Figuras 5.18 (a), (b) e (c). Como se pode observar a inclinação em mergulho reduz a margem de estabilidade, e a reação com retomada da posição horizontal da plataforma compensa a inclinação do plano de locomoção e recupera a margem de estabilidade. Nesta ilustração considera-se que as quatro patas do Guará estão apoiadas no plano da superfície de locomoção, e todas as cotas estão em milímetros.

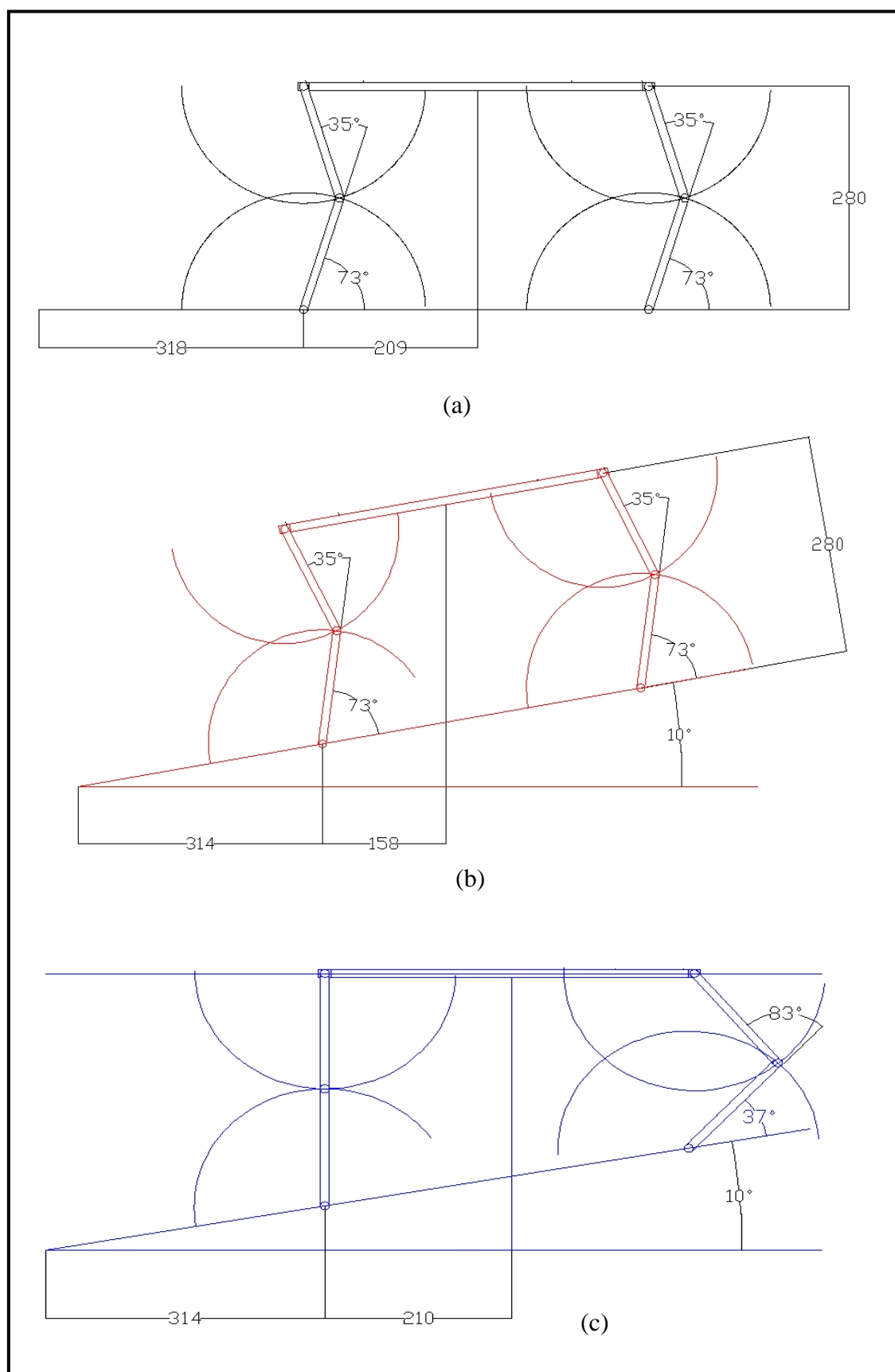


Figura 5.18 – (a) Vista lateral do Guarú em postura de início de locomoção; (b) Vista lateral do Guarú submetido a uma inclinação de mergulho do plano de locomoção; (c) Vista lateral do Guarú em postura de reação à inclinação de mergulho.

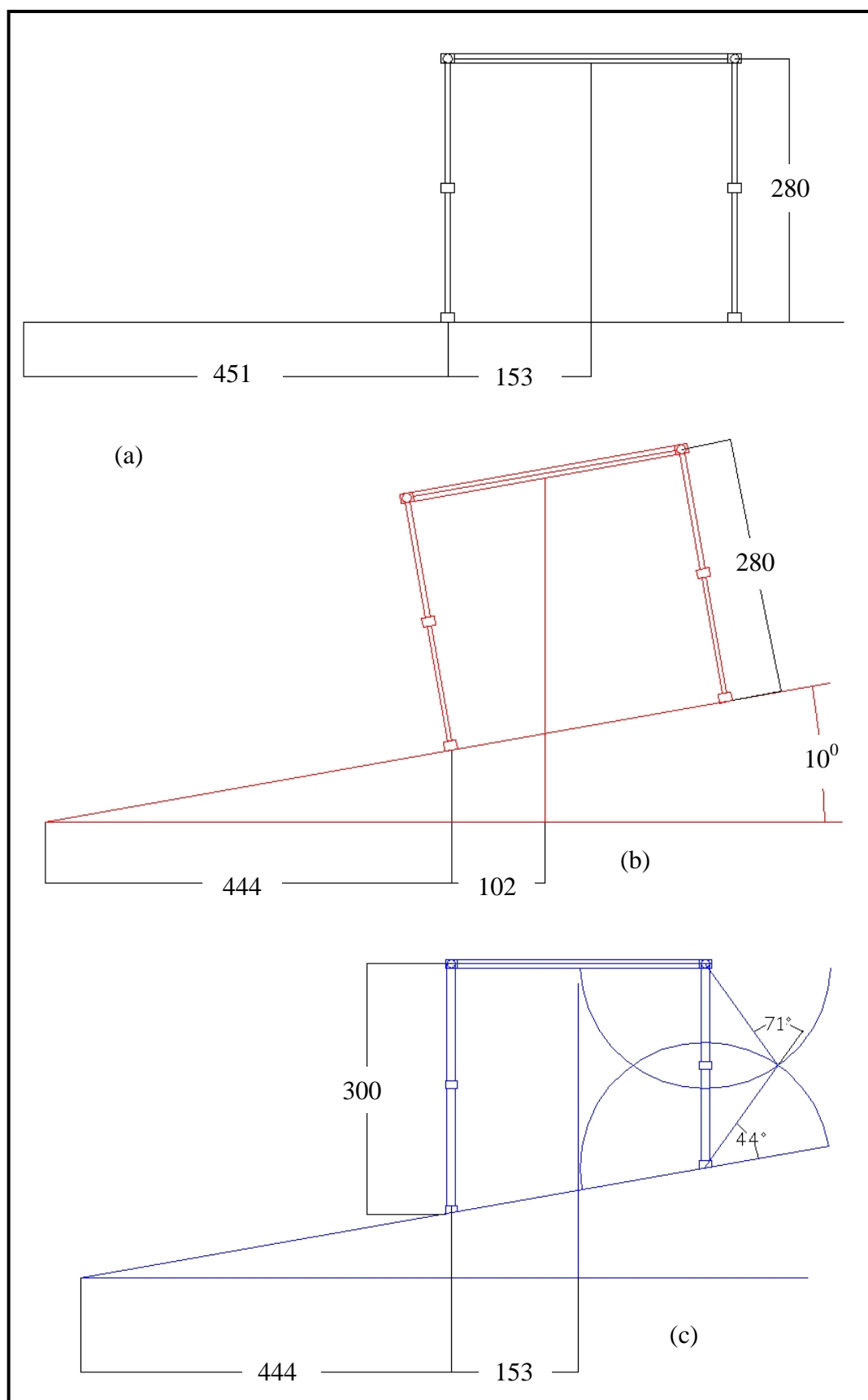


Figura 5.19 – (a) Vista frontal do Guará em postura de início de locomoção; (b) Vista frontal do Guará submetido a uma inclinação de rolagem do plano de locomoção; (c) Vista frontal do Guará em postura de reação à inclinação de rolagem.

De forma similar à reação de inclinação em mergulho, a Figura 5.19 ilustra a reação do Guará ao distúrbio de inclinação de rolagem imposta sobre o plano de locomoção, e a compensação da margem de estabilidade através da ação do reflexo.

Comprovada teoricamente a possibilidade de correção da margem de estabilidade com os reflexos propostos, e tendo sido caracterizados os movimentos de locomoção do Guará com o uso do acelerômetro, estão validados os requisitos de análise para início da implementação dos reflexos sobre o projeto. A primeira fase da etapa de implementação dos reflexos é a sintonia dos controladores nebulosos, sendo os conjuntos nebulosos para cada perna ilustrados nas Figuras 5.20 (a) e (b), os quais foram obtidos com a realização de diversos testes ilustrados a seguir.

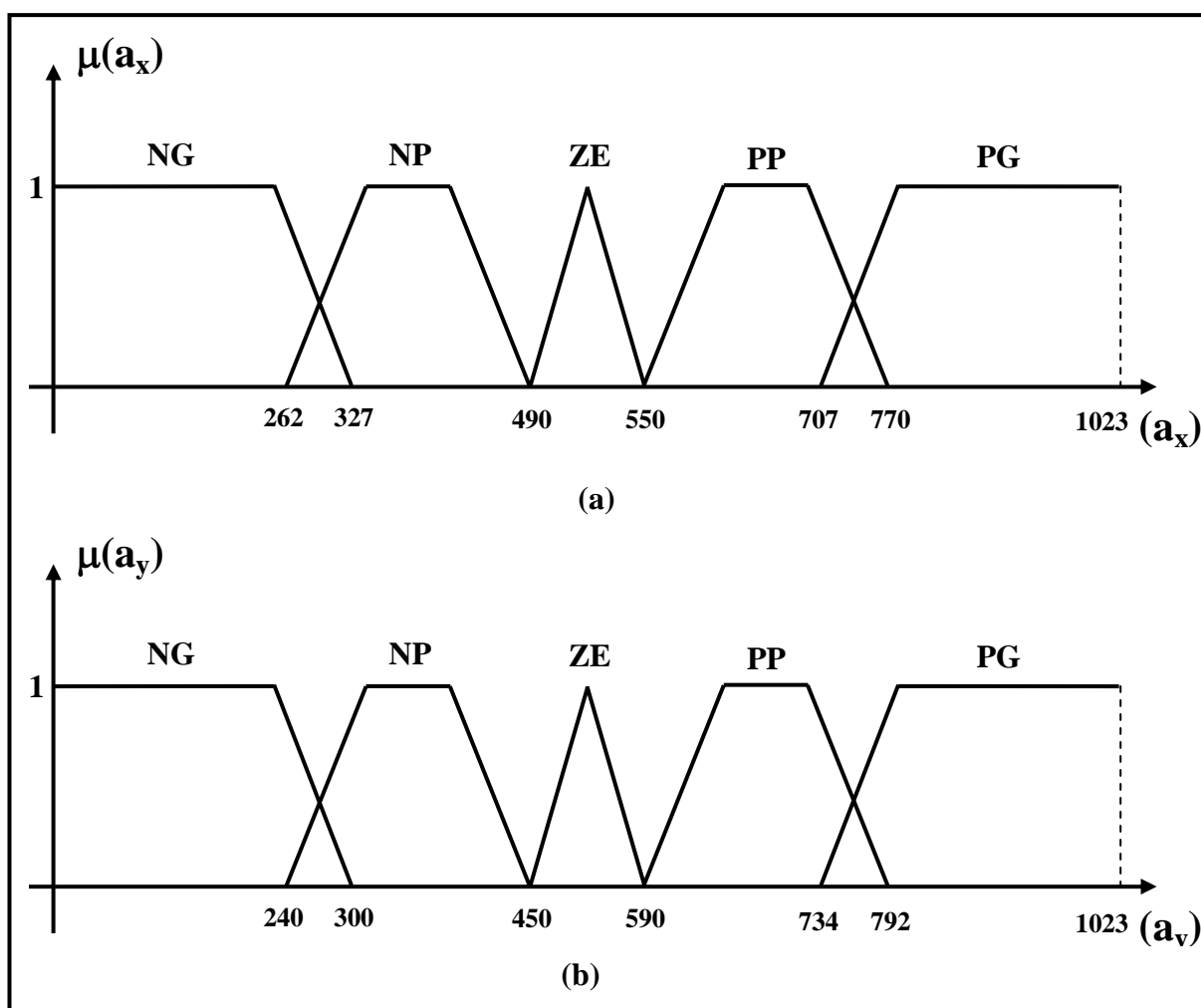


Figura 5.20 - (a) Conjuntos nebulosos para classificação de  $ACEL_x$ ; (b) Conjuntos nebulosos para classificação de  $ACEL_y$ .

A definição dos limites utilizados para as funções de pertinência considera um fator importante que é a inclinação máxima (sem reação) para a qual não ocorre tombamento nem em mergulho e nem em rolagem (limite para margem de estabilidade não nula). Considerando-se as dimensões do Guará e sua postura padrão de andadura, estas inclinações limite são de  $50^\circ$  em mergulho e  $30^\circ$  em rolagem.

Assim sendo, o condicionamento do sinal do acelerômetro foi definido de forma a estabelecer em mergulho o valor máximo da faixa de saída da conversão A/D para  $45^\circ$ , e em rolagem este valor máximo é definido para  $25^\circ$ . Para cada faixa de inclinação total permitida, em mergulho e rolagem, 33% foi estabelecida como inclinação de pequena amplitude, e a partir deste limite os controladores nebulosos processam as inclinações classificadas como de grande amplitude.

O limite para inclinação de pequena amplitude considera a possibilidade de transposição de obstáculos (Bento, 2007), condição na qual as reações de estabilidade devem ser ainda suaves, pois o nível coordenador de controle já é responsável por corrigir as referências de junta para a andadura, de modo a compensar o desnível entre as patas.

Complementando a sintonia dos controladores nebulosos, são apresentados na Figura 5.21 os conjuntos nebulosos de saída dos controladores, a partir dos quais definem-se as correções de posição atual das juntas de cada perna para geração do reflexo de estabilidade necessário.

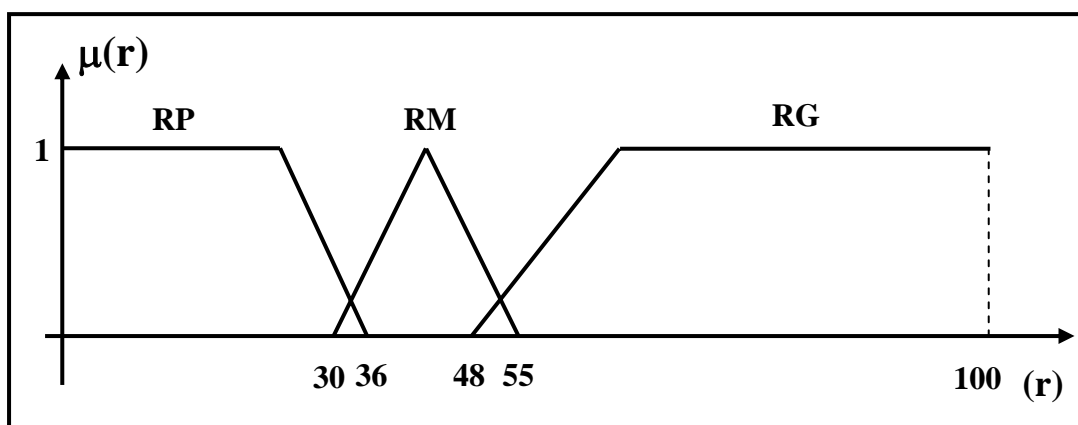


Figura 5.21 - Conjuntos nebulosos para definição do acionamento das juntas (defuzificação).

Conforme citado no capítulo anterior, os conjuntos nebulosos de saída dos controladores são expressos por limites percentuais que estabelecem a intensidade da reação necessária. Com os testes realizados (ilustrados a seguir), obteve-se a distribuição apresentada na Figura 5.21, a qual define aproximadamente 30% da faixa total de reação como limite de reação de pequena intensidade, de 30 a 50% ficou definida a faixa para reação de média intensidade, e acima de 50% é definida a reação de grande intensidade.

Vale ressaltar que os valores definidos como limites dos conjuntos nebulosos (de entrada e saída) utilizados são estabelecidos para a condição de locomoção em trajetória retilínea, à velocidade linear de 80 cm por minuto. Mudanças de operação pela velocidade de locomoção do robô, pela realização de trajetórias curvilíneas, e a transposição de obstáculos, impõem limites distintos de aceleração a serem filtrados, para não dispararem reflexos impróprios.

A adaptação às condições distintas de operação pode ser realizada através da adequação das funções de pertinência utilizadas pelo controlador nebuloso, seja pelo tipo de função utilizada ou por mudança dos limites estabelecidos para cada função.

Para as respostas em aceleração fora dos limites aceitáveis estabelecidos pelos movimentos naturais da andadura, são então disparados os reflexos de estabilidade, pela interpretação de que algum distúrbio externo agiu sobre o robô.

## **5.6 REFLEXOS OBTIDOS COM USO DO ACELERÔMETRO**

Com base na análise das repostas obtidas pelo acelerômetro, para as diversas condições de instabilidade de equilíbrio do Guará, torna-se possível a implementação dos reflexos de estabilidade. Os testes realizados para calibração destes reflexos são apresentados nesta seção, com ilustração de imagens obtidas em tempo de execução.

### **5.6.1 Testes dos reflexos para balanço em mergulho e rolagem**

Inicialmente foram testados reflexos para inclinação da plataforma do Guará com o uso de uma gangorra. Este teste comprovou a coerência dos reflexos obtidos a partir do estímulo de mudança da inclinação da plataforma.

A Figura 5.22 ilustra três fases deste teste. Na fase inicial (a) o robô ainda não está submetido a nenhuma inclinação; já na segunda fase (b) observa-se uma inclinação de rolagem com tendência de tombamento sobre as pernas 2 e 3, o que dispara o reflexo de esticar as pernas 2 e 3 e encolher as pernas 0 e 1. Na última fase deste teste (c) impõe-se a inclinação de tombamento contrária, o que define o reflexo de encolher as pernas 0 e 1 e esticar as pernas 2 e 3. Já na Figura 5.23 os testes são apresentados para a inclinação em mergulho, com a respectiva reação das pernas para compensação desta inclinação.



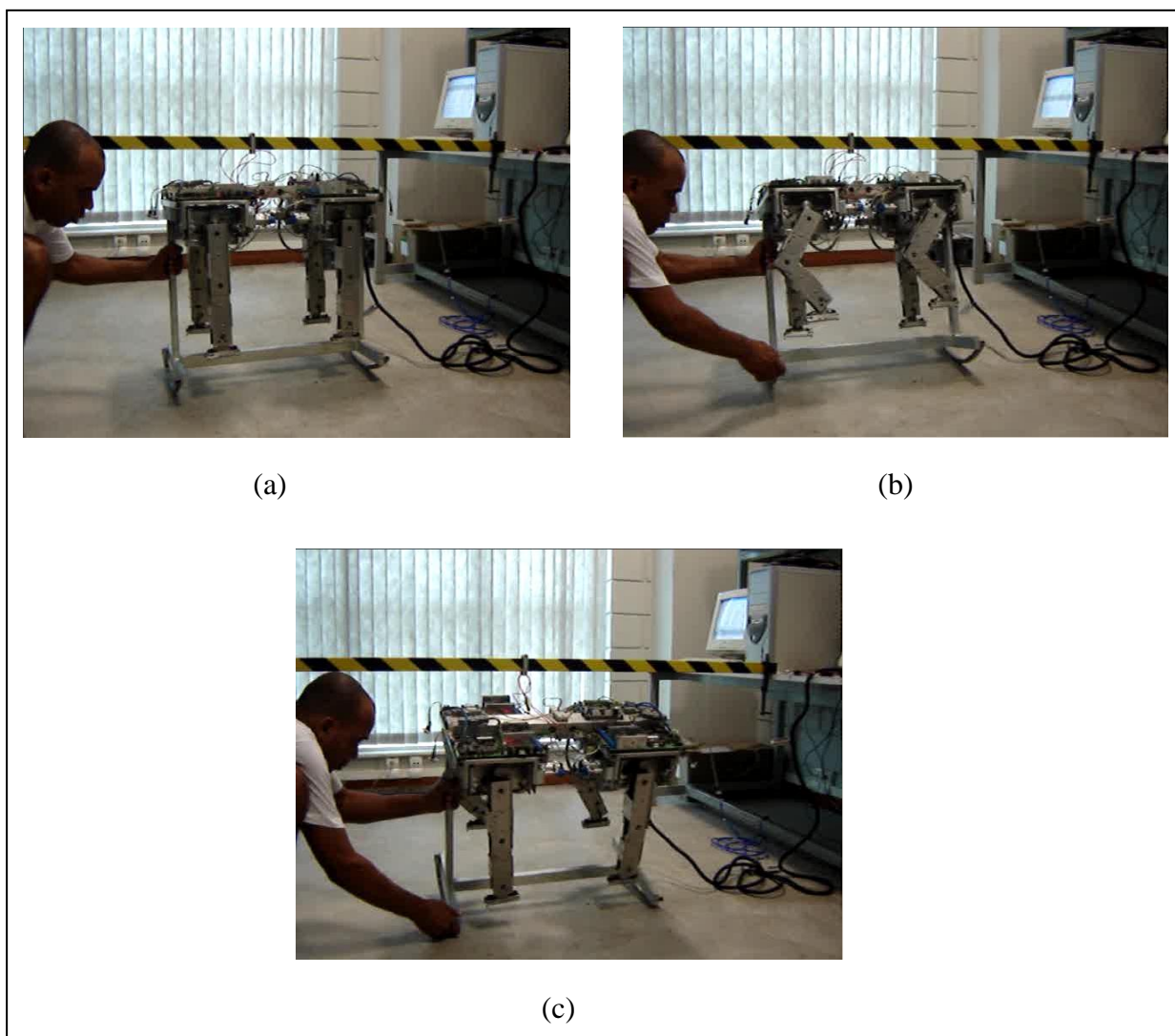


Figura 5.22 – Teste de reação à rolagem.

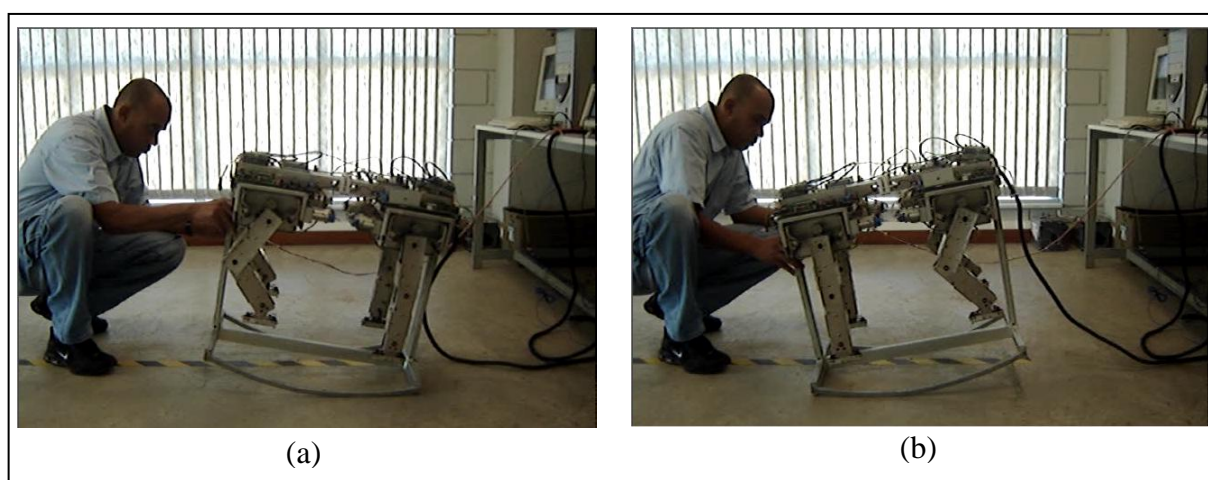


Figura 5.23 - Teste de reação ao mergulho.

Para os testes ilustrados nas Figuras 5.22 e 5.23, os reflexos gerados não corrigiram a inclinação da plataforma, pois o Guará está sustentado pela gangorra, e observa-se, a partir dos valores medidos nesta condição, que é imposta uma significativa variação nas acelerações  $ACEL_X$  e  $ACEL_Y$ . A observação deste comportamento da aceleração medida é importante para que se tenha uma referência quantitativa da correção de inclinação da plataforma obtida com a ação dos reflexos de estabilidade.

As Figuras 5.24 e 5.25 ilustram o comportamento das acelerações medidas na ausência da ação dos reflexos de estabilidade.

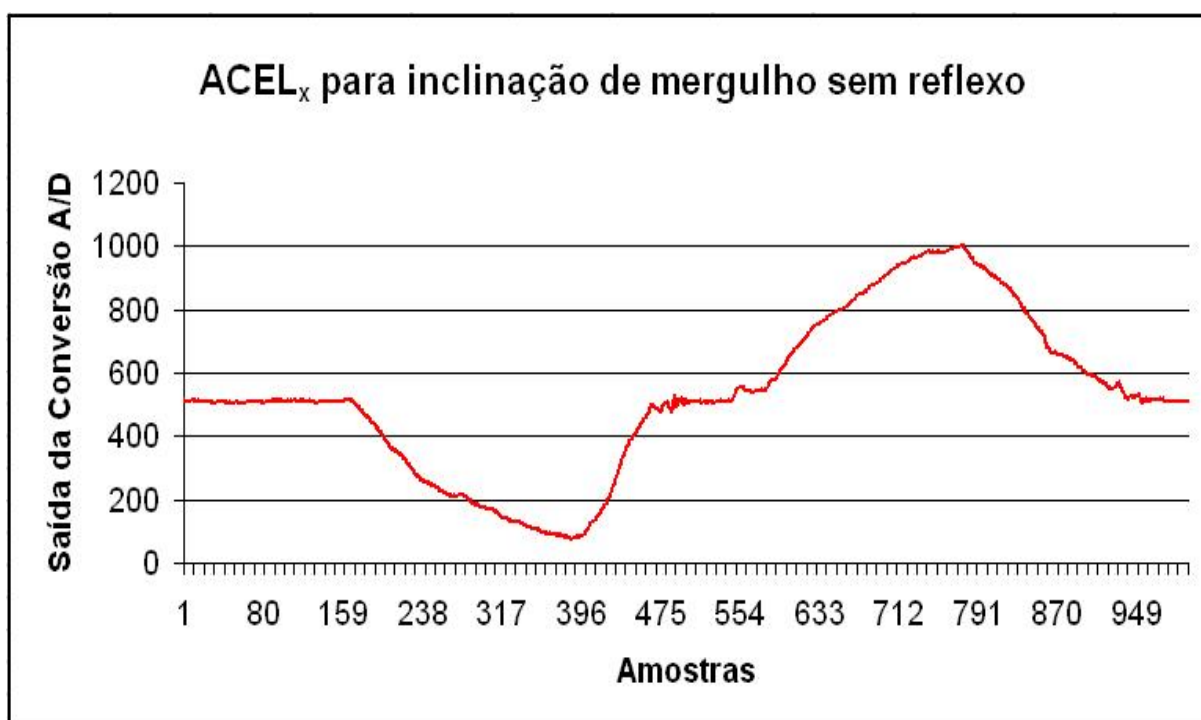


Figura 5.24 – Comportamento de  $ACEL_X$  para instabilidade de inclinação de mergulho sem a ação de reflexos de estabilidade.

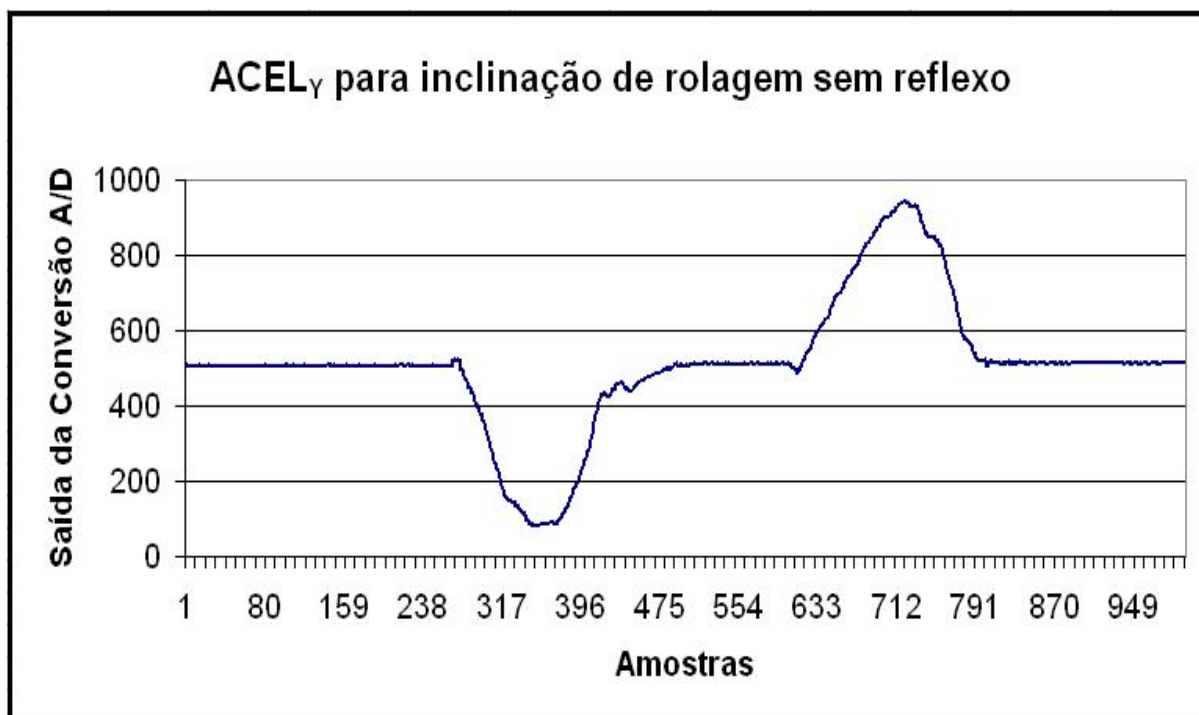


Figura 5.25 - Comportamento de ACEL<sub>Y</sub> para instabilidade de inclinação de rolagem sem a ação de reflexos de estabilidade.

### 5.6.2 Reflexos para inclinação longitudinal (mergulho positivo e negativo)

Para a verificação de desempenho dos reflexos em resposta à inclinação longitudinal do Guará, foram realizados testes com a imposição de mudança na inclinação do plano de apoio do robô. Conforme ilustram as Figuras 5.27 e 5.28, os reflexos disparados para compensação da instabilidade imposta são: mergulho positivo e negativo, de modo a buscar a inclinação horizontal da plataforma.

A Figura 5.26 apresenta o comportamento da aceleração ACEL<sub>X</sub> em resposta à inclinação forçada do plano de locomoção. Através desta figura pode-se observar que a recuperação da inclinação da plataforma é suficiente para a retomada de uma postura de equilíbrio, que não necessariamente coincide com a condição horizontal da plataforma (ACEL<sub>X</sub>  $\cong$  512).

Para que a recuperação de postura defina plataforma em posição totalmente horizontal, é necessário que o conjunto nebuloso “ZERO” de entrada tenha uma base estreita, o que pode disparar reflexos durante os movimentos normais da andadura. Assim, é necessário respeitar uma relação de compromisso entre o equilíbrio do robô e a horizontalidade da plataforma.

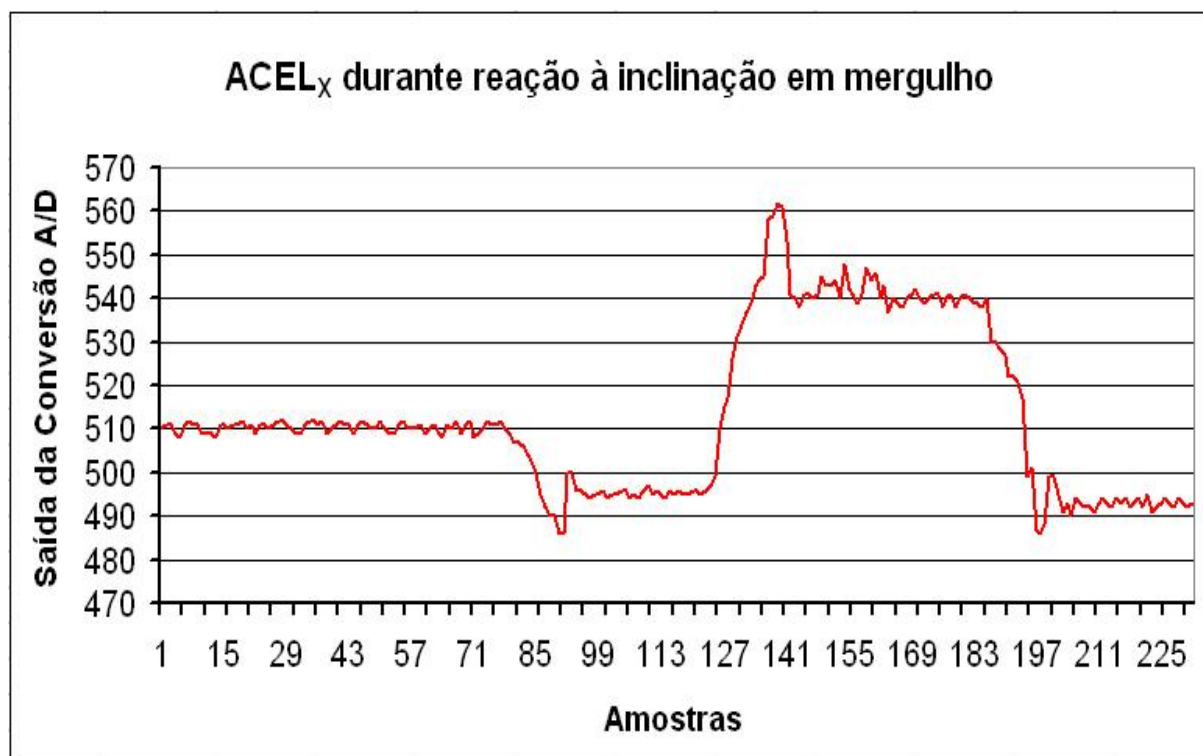


Figura 5.26 – Resposta do acelerômetro à inclinação forçada de mergulho do plano de locomoção.

A sequência de imagens da Figura 5.27 mostra que na medida em que a inclinação do plano de apoio do robô aumenta em sua dianteira, as pernas dianteiras (pernas 0 e 2) são flexionadas em busca de manter a postura horizontal da plataforma, e simultaneamente aumentar a margem de estabilidade (projetando o CG para a dianteira), evitando o tombamento para trás. Com a eliminação da instabilidade na inclinação do plano de apoio, as quatro pernas reagem para restabelecer a postura horizontal do Guará.



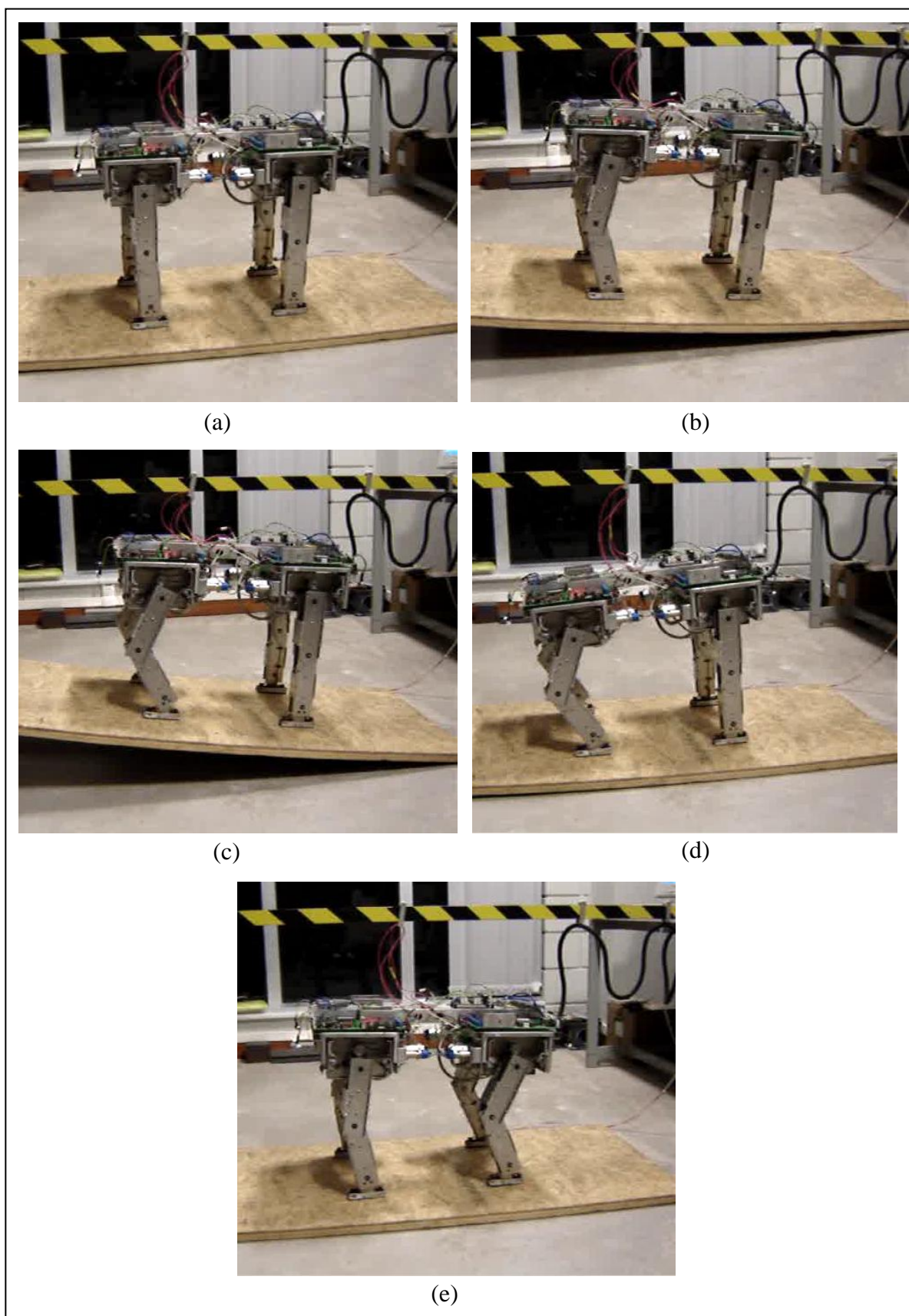


Figura 5.27 – Reflexo de compensação à inclinação sobre pernas dianteiras, mergulho positivo.

A Figura 5.28 ilustra o reflexo que é disparado quando a inclinação do plano de apoio é imposta pela traseira do Guará, o que força os movimentos de esticar as pernas dianteiras (pernas 0 e 2) e flexionar as pernas traseiras (pernas 1 e 3). Este reflexo, além de manter a postura horizontal do Guará, desloca o CG para a sua traseira, aumentando a margem de estabilidade e evitando o tombamento do robô.



Figura 5.28 - Reflexo de compensação à inclinação sobre pernas traseiras, mergulho negativo.

### 5.6.3 Reflexos para inclinação transversal (rolagem positiva e negativa)

Também foram realizados testes para os reflexos com uso de rolagem e balanço transversal, na compensação de inclinação transversal do plano de apoio do robô. O comportamento de  $ACEL_Y$  durante a execução dos reflexos de estabilidade está ilustrado na Figura 5.29, e também vale para a análise desta reposta a observação de que a retomada de postura visa a condição de equilíbrio do robô, mas não necessariamente restabelece a posição horizontal da plataforma.



Figura 5.29 - Resposta do acelerômetro à inclinação forçada de rolagem do plano de locomoção.

A Figura 5.30 ilustra fases deste teste, nas quais se pode observar a conjugação da rolagem, pernas de uma mesma lateral sendo flexionadas e pernas esticadas na lateral oposta, e, simultaneamente, o balanço transversal que se percebe com a inclinação transversal das pernas.

Neste caso, a conjugação de reflexos torna-se necessária para que se consiga, dentro dos limites cinemáticos das juntas de cada perna, a correção da margem de estabilidade e a manutenção do equilíbrio.



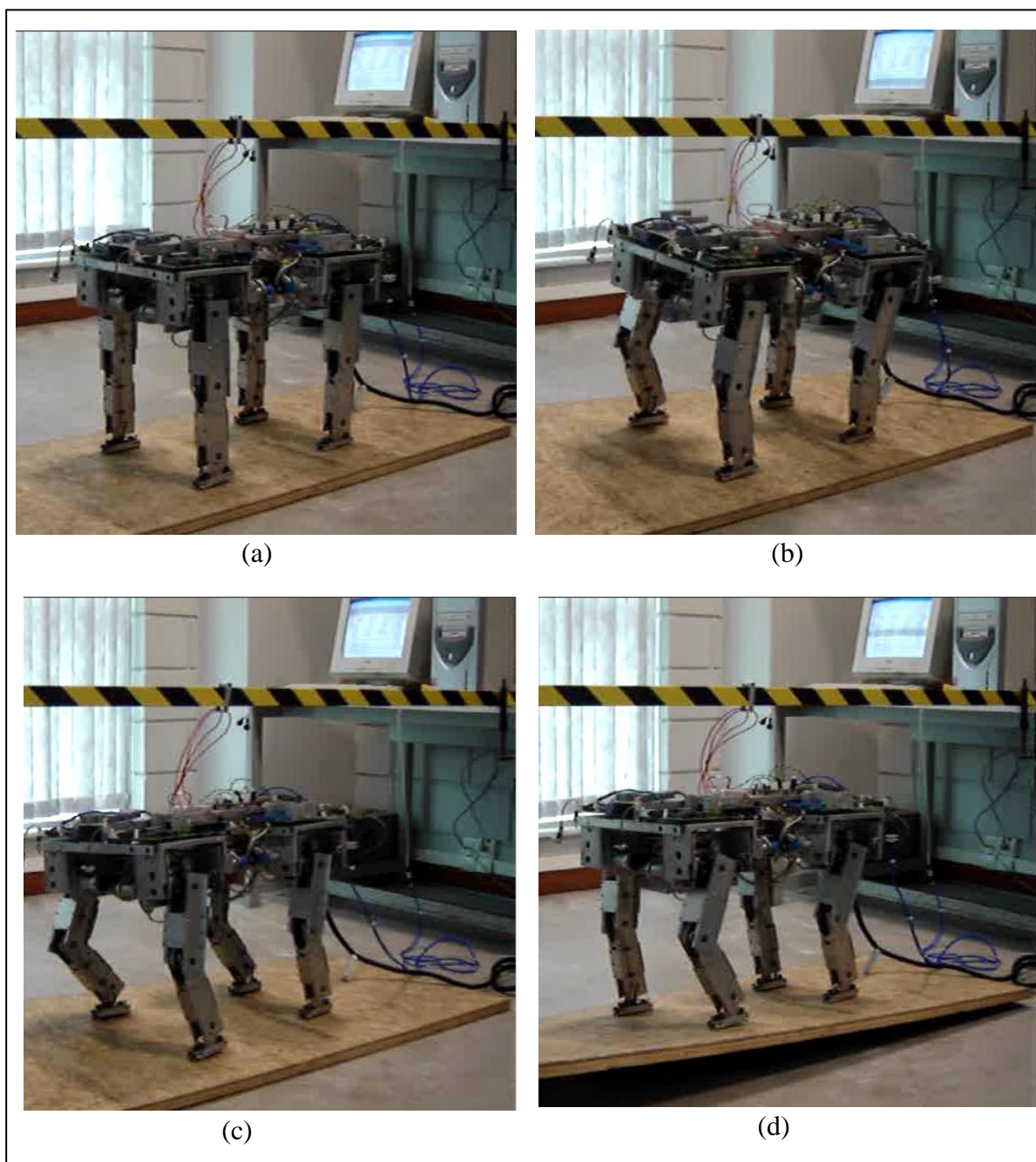


Figura 5.30 - Reflexo de compensação à inclinação transversal, com reflexo composto de rolagem e mergulho.

#### 5.6.4 Reflexo para mergulho forçado por referências

Para comprovar que os reflexos de estabilidade também são disparados caso uma postura indesejável seja estabelecida aleatoriamente, foi realizado um teste no qual referências são transmitidas ao Guará para definir uma inclinação de mergulho que exija correção de postura.

A Figura 5.31 ilustra a correção da postura do Guará para duas condições opostas: na fase (b) uma inclinação de mergulho positivo é imposta, com correção por flexão das pernas traseiras ilustrada na fase (c). E no segundo teste deste tipo, impõe-se uma inclinação de



mergulho negativo na fase (d), que é corrigida com flexão das pernas dianteiras ilustrada na fase (e).

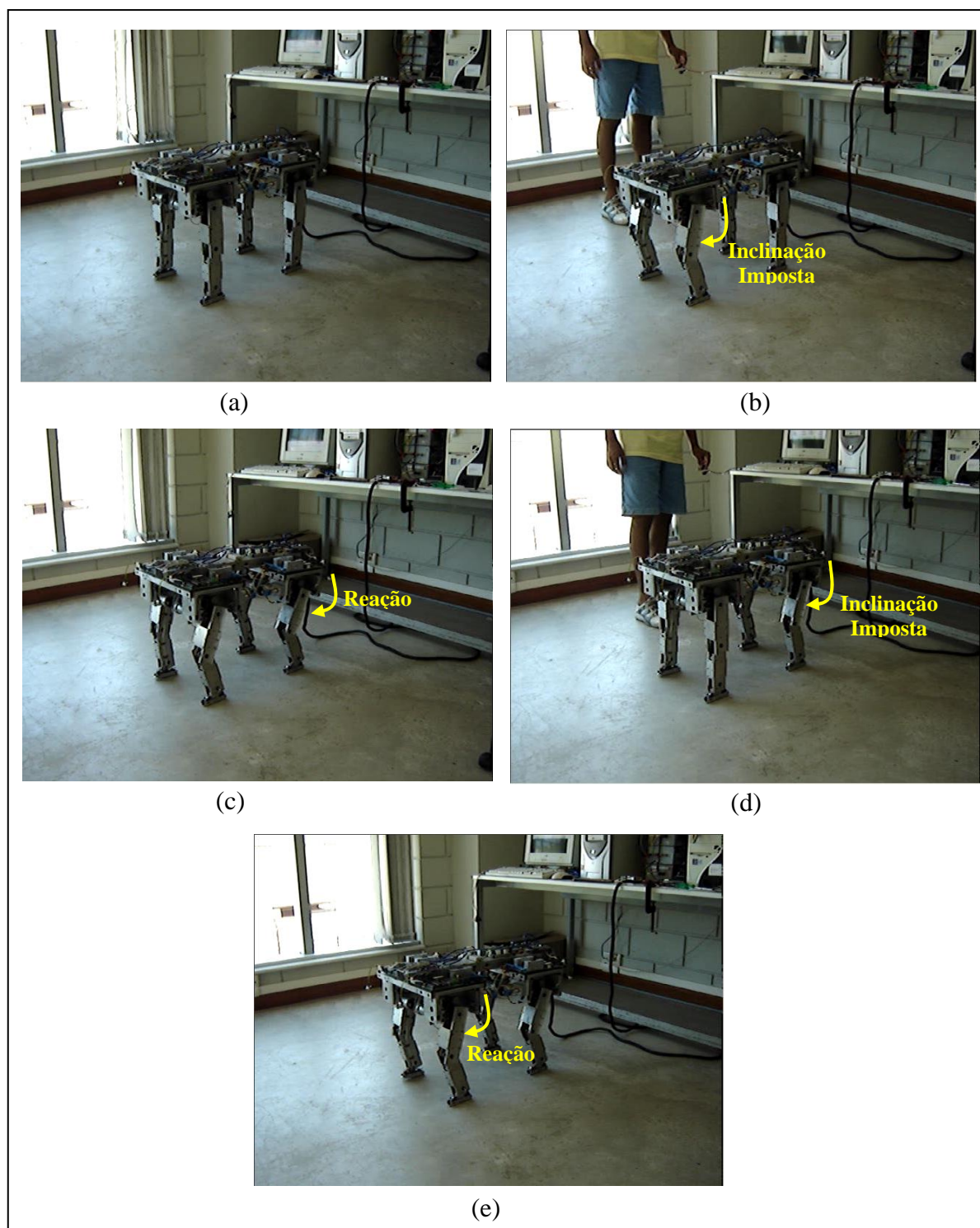


Figura 5.31 – Reflexo para correção de erro na postura causado por geração incorreta de referências.

### 5.6.5 Resposta à instabilidade de equilíbrio durante execução da andadura

Todos os testes executados contribuem para a comprovação da validade de aplicação da lógica nebulosa e sensoriamento, com uso de um acelerômetro para correção da postura do Guará em resposta a uma instabilidade de equilíbrio. Os testes apresentados se restringiram à condição de robô estacionado, e estimulam a iniciativa de recuperação da estabilidade de equilíbrio a partir da execução de uma andadura.

O teste dos reflexos de estabilidade durante a execução da andadura foi realizado com o uso do procedimento de interrupção da andadura para execução das reações. Os processos utilizados neste teste são apresentados no diagrama de estados da Figura 5.32.

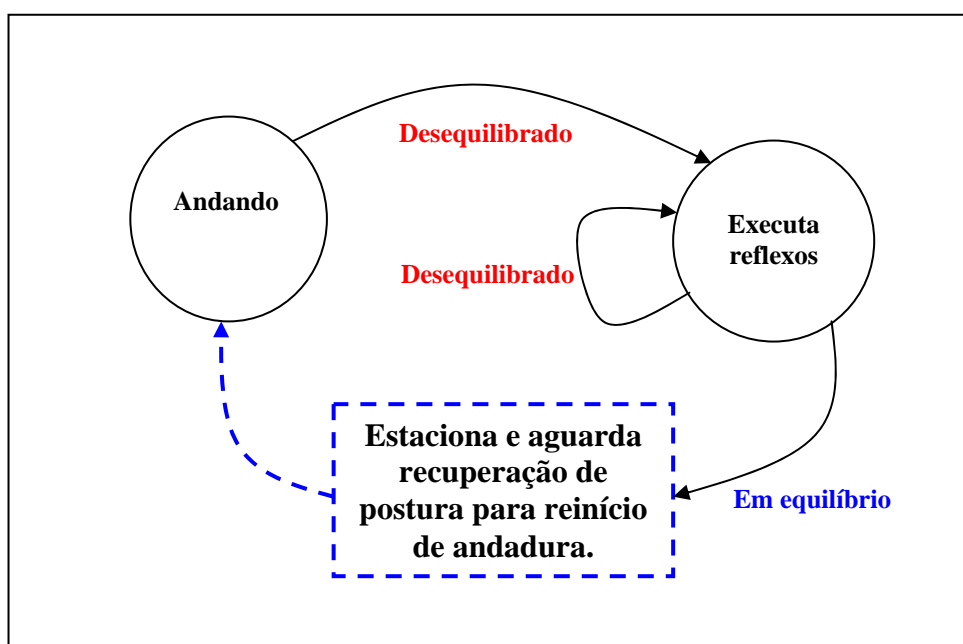


Figura 5.32 – Diagrama de estados utilizados para realização do teste de reflexos durante a execução de andadura.

De acordo com o diagrama de estados apresentado na Figura 5.32, durante a locomoção o nível supervisor de controle está frequentemente observando o estado de equilíbrio do robô por meio da leitura do acelerômetro. Quando é detectada a condição de desequilíbrio, são disparados os reflexos de estabilidade, que atuam até que a condição de equilíbrio estável seja novamente alcançada.

Restabelecida a condição de equilíbrio, o robô estaciona e aguarda a recuperação de postura para reiniciar a execução da andadura. Para a arquitetura e estratégia de controle proposta, esta recuperação tem que ser definida pelo nível supervisor de controle, pois há necessidade de processamento do modelo cinemático do Guará para reposicionamento das pernas na obtenção da condição inicial de andadura.

A Figura 5.33 ilustra fases do teste de reflexos de estabilidade realizado no decorrer da locomoção do Guará, o que permite uma análise de desempenho e a descrição de propostas para evolução desta estratégia.

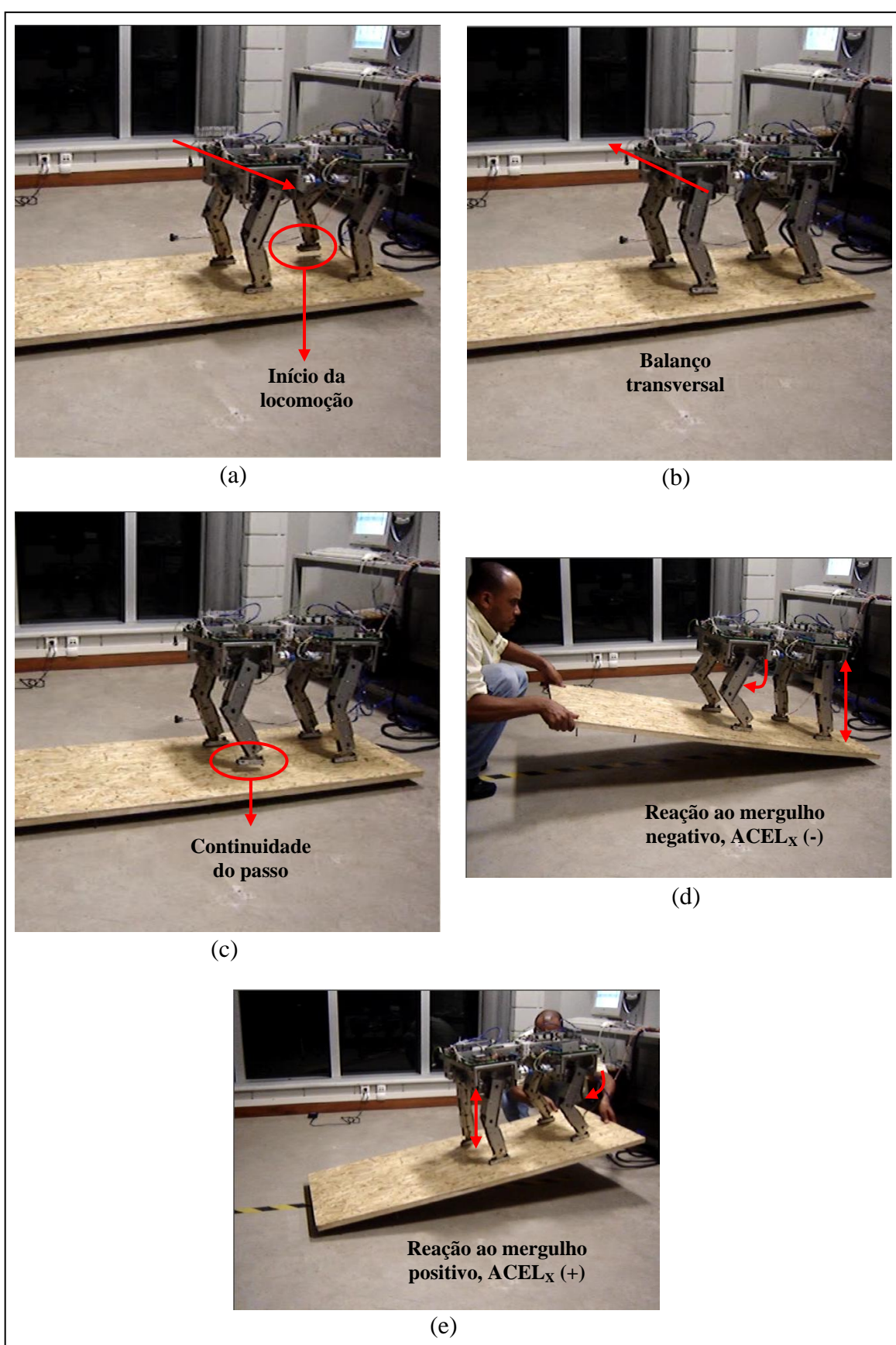


Figura 5.33 – Fases do teste de reflexos de estabilidade durante a locomoção do Guarã.

As fases do teste de reação durante andadura, apresentadas na Figura 5.33, comprovam a possibilidade de sintonia do controlador nebuloso de modo a permitir a locomoção sem interferência de reação aleatória (espúria). Conforme anteriormente citado, definidos os limites de resposta do acelerômetro aos movimentos naturais da andadura tornou-se possível o ajuste das funções de pertinência de entrada (classificação dos níveis de aceleração), de modo a filtrar as oscilações que pudessem gerar reações indesejáveis.

Estas afirmações baseiam-se na análise experimental, ilustrada nas fases (a), (b) e (c) da Figura 5.33, nas quais o Guará desempenha movimentos de vôo das pernas e balanço transversal sem interferências indesejáveis.

As fases (d) e (e) deste teste definem a implementação experimental do chaveamento proposto entre o estado de andadura e o estado de reação do Guará, anteriormente apresentado no diagrama de estados da Figura 5.32. Pode-se observar que duas condições de desequilíbrio foram geradas consecutivamente (mergulho positivo e negativo), com as respectivas reações para retomada do equilíbrio e obtenção de postura estável.

Com os testes apresentados neste capítulo, fica comprovada a eficiência da arquitetura de controle proposta. Esta arquitetura se propõe a dotar o Guará, um robô móvel quadrúpede com dezesseis graus de liberdade, com a capacidade de locomoção incluindo trajetórias curvilíneas e reação a instabilidades de equilíbrio.

Vale ressaltar que a arquitetura proposta apresenta mais uma solução para o problema de recuperação do equilíbrio de robôs móveis quadrúpedes, a partir do uso de lógica nebulosa e sensoriamento por acelerômetro. Desta forma, a solução obtida define-se com baixo custo de implantação e baixo custo computacional, sendo ainda flexível em função da adaptabilidade associada a controladores nebulosos.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos comprovam que a arquitetura de controle proposta possibilita ao Guará a interação com ambientes semi-estruturados, em nível de locomoção com mudança de orientação no decorrer da trajetória, e reação à instabilidades de equilíbrio. O desempenho alcançado na realização dos testes evidencia a validade de características importantes como:

- a hierarquização de camadas de controle, com a distinção entre camadas para supervisão e planejamento e camadas para coordenação e reação. Esta estrutura é bem adequada a robôs quadrúpedes, pois estes exigem um nível de controle que concentre a observação da configuração completa do robô, o que permite a sincronização dos movimentos das pernas;
- o êxito com a aplicação da lógica nebulosa para o controle dos reflexos de estabilidade, reduzindo o custo computacional pela não obrigatoriedade de processamento de modelos matemáticos não-lineares, e, conseqüentemente, com ganho na velocidade de resposta às instabilidades de equilíbrio;
- a comprovação da viabilidade de uso de um acelerômetro como elemento sensor de instabilidades de equilíbrio. Esta condição também contribui muito para a redução do custo de implementação e do custo computacional na geração de reflexos de estabilidade.

Estas características principais da arquitetura de controle proposta para o Guará são sustentadas pelas estruturas de *software e hardware* implementadas nos três níveis de controle da arquitetura. Os resultados obtidos, tanto para a locomoção como para a reação a instabilidades de equilíbrio confirmam que as estruturas de *software e hardware* implementadas são suficientemente eficazes para estudos de tipos de andadura, detecção e reação a obstáculos e reflexos de estabilidade.

Vale ressaltar que a arquitetura de controle proposta (hierárquica em três camadas) não impõe o uso de componentes específicos, sendo flexível à atualização por aplicação de outros modelos de unidades processadoras.

Sendo o foco principal desta tese a geração de comportamentos reflexivos de estabilidade para um robô quadrúpede, é relevante ressaltar de forma mais detalhada as conclusões obtidas do estudo da solução implementada. Também é importante que, a partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, sejam apontados passos futuros para continuidade e evolução deste projeto.

### 6.1 A ESTRATÉGIA DE REAÇÃO PARA ESTABILIZAÇÃO DO EQUILÍBRIO

A integração entre as informações obtidas do acelerômetro de dois eixos, o estado de apoio do robô sobre a superfície de locomoção e a postura definida pelas pernas, sendo processadas pelos controladores nebulosos, resultou em um sistema de controle eficiente para a manutenção da estabilidade de equilíbrio.



Este sistema reúne características importantes como:

- a) baixo custo de implementação e reduzido custo computacional pela não dependência de processamento de relações matemáticas não-lineares;
- b) velocidade de resposta compatível com as instabilidades impostas ao Guará;
- c) adaptação síncrona obtida para o chaveamento entre o processamento de locomoção e os reflexos de estabilidade, principalmente considerando-se que estas ações são gerenciadas por níveis distintos de controle.

É importante ressaltar que o uso do acelerômetro impõe o custo de restringir o robô a tarefas executadas em baixa velocidade, pois, as vibrações do corpo do robô em movimentos de alta velocidade geram acelerações que mascaram o sensoramento de inclinação da plataforma. Porém, vale lembrar que diversas tarefas relevantes da atualidade são realizadas em baixa velocidade. Pode-se citar inspeção (corrosão, fissuras), transporte de cargas frágeis, limpeza, dentre outras.

A não obrigatoriedade de processamento de modelos matemáticos atribui a esta estratégia uma redução significativa de custo computacional e, simultaneamente, permite uma flexibilidade de adaptação a condições distintas de instabilidade.

O uso de controladores nebulosos impõe o custo de uma análise qualitativa minuciosa e rigorosa de comportamento para obtenção de uma sintonia adequada dos reflexos de cada perna. Em compensação, a obtenção do algoritmo de controle necessário é menos dependente da exigência de alto grau de precisão na definição de parâmetros físicos como massas, inércias, coeficientes de atrito, dentre outros, que inclusive podem variar de acordo com as tarefas a serem realizadas, influenciando o desempenho da ação de controle.

Também vale ressaltar que as relações cinemáticas e dinâmicas que definem a manipulação das pernas para a obtenção de locomoção estável não são relações lineares, o que implica em acréscimo no tempo necessário de processamento para definição das reações ou a necessidade de emprego de unidades processadoras com elevada capacidade de processamento.

A interação do processo de reação para estabilidade do equilíbrio e a execução da locomoção é um aspecto muito importante da solução proposta, pois para isto é necessário o compartilhamento da informação sobre o estado do robô e o sincronismo entre interrupção e disparo simultâneo de processos executados em níveis distintos de controle. Vale ainda ressaltar que esta dinâmica está aplicada a um robô quadrúpede, no qual a reação de cada perna tem que assumir um comportamento que complemente a ação das pernas vizinhas e garanta a obtenção de posturas estáveis.

Assim sendo, a redução de custo computacional pelo não processamento de modelos analíticos se reverte para a implementação de bancos de regras nebulosas que permitam o sincronismo de reação das pernas. Também vale lembrar que, restabelecida a condição de equilíbrio, a gerência de controle do robô deve ser entregue ao nível supervisor, para que, este conhecendo a nova postura assumida, possa reiniciar a locomoção.

Com base nos testes realizados e resultados obtidos, pode-se afirmar que a estratégia proposta apresenta bom desempenho para as tarefas atribuídas ao Guará, o que valida esta proposta como uma contribuição em termos de alternativas de geração de reflexos de estabilidade.

## 6.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Referente ao estudo de recuperação da estabilidade de equilíbrio, pode-se citar algumas linhas de trabalho que dão continuidade a este projeto.

Neste trabalho foi adotada a estratégia de interrupção dos passos da andadura para correção da postura do robô. Uma segunda abordagem interessante é a correção das referências de cada junta das pernas em tempo de execução da andadura (sem interrompê-la), para recuperação da estabilidade de equilíbrio. Esta proposta, se implementada, permitirá maior agilidade no chaveamento entre os processos de andar e reagir, e, conseqüentemente, contribuirá para a velocidade de execução da macro-tarefa atribuída ao robô (realização de uma dada trajetória).

A recuperação de postura do robô para reinício da andadura exige do nível supervisor de controle as seguintes tarefas: identificação de início do processamento de reflexos (já implementado), identificação de retomada de equilíbrio em uma postura genérica, recuperação de postura para reinício de andadura e reinício de locomoção. Uma vez identificado o início do processamento dos reflexos, o nível supervisor de controle interrompe o envio de referências para execução da locomoção, mas as demais tarefas necessárias após a retomada do equilíbrio ainda não estão implementadas. Esta continuidade no trabalho é importante para permitir ao Guará execução completa de uma trajetória (macro tarefa), ainda que em pontos intermediários da mesma sejam executados reflexos de estabilidade.

A postura de posição horizontal da plataforma do Guará pode não ser garantia de não existência de uma instabilidade de equilíbrio. Se o Guará for submetido a um impacto na direção longitudinal ou transversal (esforço externo como distúrbio aplicado no mesmo plano definido pela plataforma do robô), a reação necessária não será obtida dos estudos realizados para regras comportamentais de reação a inclinação da plataforma. Neste caso, surge a necessidade de identificação da natureza da causa da instabilidade de equilíbrio, se é inclinação da plataforma ou impacto exercido sobre o robô, para que se possa definir as regras comportamentais a serem utilizadas.

A inclusão do sistema de visão no Guará, já em desenvolvimento (Orlandi, 2007), estimula a pesquisa de outras estratégias para a geração de reflexos de estabilidade. O processamento das imagens, permitirá a definição de dimensões dos obstáculos presentes no ambiente de locomoção, e também criará a possibilidade de identificação da aproximação de outros corpos, proporcionando a geração de reflexos preditivos. A partir das informações capturadas pelo processamento de imagens, torna-se possível antecipar a calibração de intensidade dos reflexos a serem gerados e também viabiliza a geração de ações preventivas, tais como afastar-se de um eminente impacto.

Assim, dos resultados obtidos para a solução proposta e das sugestões citadas para trabalhos futuros, conclui-se que o projeto desenvolvido traz contribuições à pesquisa da robótica móvel. Enquanto pesquisa científica, este projeto cumpre a meta de comprovar hipóteses de solução para um problema vastamente estudado na atualidade (adaptação de robôs quadrúpedes à exploração de ambientes), e permite a propagação de conhecimentos a outros pesquisadores pela oportunidade de continuidade.

## Referências Bibliográficas

Albiez, J. et al. **Learning a reactive posture control on the four-legged walking machine BISAM**, Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ – International Conference on Intelligent Robots and Systems, v.2, p. 999-1004, Hawaii, 2001.

Albus, J.S.; Lumia, R.; McCain, H. **Hierarchical Control of Intelligent Machines Applied to Space Station Telerobots**, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 24, n.5, p. 535-541, Set. 1988.

Analog Devices, **Low-cost  $\pm 2g$  dual-axis accelerometer with duty cycle output**, Rev. A, Analog Devices Inc., disponível em <<http://www.analog.com>>, p. 1-12, 2000.

Arkin, R.C.; Riseman, E.M.; Hansen, A. **AuRA: an architecture for vision-based robot navigation**, Proceedings of the DARPA Image Understanding Workshop, p. 417 – 431, Los Angeles, Fev. 1987.

Bento Filho, A.; Amaral, P.F.S.; Pinto, B.G.M.; Lima, L.E.M. **Uma metodologia para a localização aproximada de um robô quadrúpede**, Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática – CDROM, Gramado-RS, 2004.

Bento Filho, A.; **Modelagem, controle de andadura e transposição de obstáculos de um robô quadrúpede com quatro graus de liberdade em cada perna**, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Ago. 2007.

Berns, K. et al. **Mechanical construction and computer architecture of the four-legged walking machine BISAM**, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, v. 4, n. 1, p. 32-38, Mar. 1999.

Briskin, E.S.; Chernyshev, V.V; Maloletov, A.V. **On conception of walking machines designing**, Proceedings of ICAR – 11th International Conference of Advanced Robotics, CDROM, Portugal, 2003.

Brooks, R.A. **A Robust Layered Control System for a Mobile Robot**, IEEE Journal of Robotics and Automation, vol.1, no.1, pp. 14-23, 1986.

Dean, T.; Wellman, M. **Planning and control**, Morgan Kaufmann Publishers, USA, 1991.

Decuir, J.D. et al. **A friendly face in robotics: Sony's AIBO entertainment robot as an educational tool**, ACM Entertainment in Computers, v.2, n.2, p. 1-4, Abr. 2004.

Dillman, R. et al. **Biologically motivated control of walking machines**, “Climbing and Walking Robots”, Springer Berlin Heidelberg, p. 55 - 69, USA, Jan. 2006.

Dudek, G.; Jenkin, M. **Computational principles of mobile robotics**, Cambridge University Press, USA, 2000.

Firby, R.J. et al. **An architecture for vision and action**, Proceedings of 1995 International Joint Conference on Artificial Intelligence, Morgan Kaufmann Publishers, Canada, 1995.



Fukuoka, Y.; Kimura, H.; Cohen, A. H. **Adaptative dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain based on biological concepts**", IJRR – International Journal of Robotics Research, Sage Publications, v.22, n.3-4, p.187-202, USA, 2003.

Gámiz, J. et al. **Practical evaluations of messages latencies in CAN**, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, v.1, p. 185-192, Set. 2003.

Gat, E. **Three-layer architectures, artificial Intelligence and mobile Robots**, MIT Press, USA, 1998.

Hasnaoui, S.; Bouallegue, A. **A proposal modification of CAN protocol to support a dynamic priority policy being able to be implemented on CAN fieldbus controller components**, Proceedings of the IEEE Conference in Industry Applications, v.2, p. 1129 - 1136, Roma, Out. 2000.

Hirose, S.; Kato, K. **Study on quadruped walking robot in tokyo institute of technology – past, present and future**, Proceedings of the IEEE, International Conference in Robotics and Automation, v.1, p. 414 - 419, San Francisco, Abr. 2000.

Holzman, G.J. **Design and validation of computer protocols**", Prentice Hall, USA, 1991.

Hong, S.H.; Kim, W.H. **Bandwidth allocation scheme in CAN protocol**, IEE Proceedings Control Theory Applications, v. 147, n.1, p. 37 – 44, Jan. 2000.

Hu, H.; Gu, D. **A multi-agente systems for cooperative quadruped walking robots**, Proceedings of IASTED International Conference Robotics and Applications, Hawaii, p. 5, 2000.

Huang, B.; Wang, P.; Sun, L. **Behavior-based Control of a Hybrid Quadruped Robot**, Proceedings of the 6<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation, v.2, p. 8997-9001, Dalian, Jun. 2006.

Intel Databook, **82527 – Serial communications controller architectural overview**, Intel Corporation, 1996.

Ishihara, W.M.; **Desenvolvimento e construção de um robô de 4 patas**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1998.

Kang, T. et al. **Design of quadruped walking and climbing robot**, Proceedings of the IEEE – Conference on Intelligent Robots and Systems, v.1, p. 619 – 624, Las Vegas, Out. 2003.

Kang, S. et al. **ROBHAZ-Rescue: rough-terrain negotiable teleoperated mobile robot for rescue mission**, Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, p. 105-110, Jun. 2005.

Kimura, H.; Fukuoka, Y. **Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain by using neural system model**, Proceedings of the IEEE International Conference Intelligent Robots and Systems, v.2, p. 979 - 984, Takamatsu, Nov. 2000.

Konno, A. et al. **An adaptative gait for quadruped robots to walk on a slope**, Proceedings of the IEEE/RSJ, International Conference on Intelligent Robots and Systems, v.1, p. 589 – 594, Nevada, Oct. 2003.

Konolige, K.; Myers, K. **The Saphira Architecture for autonomous mobile robots**, Artificial Intelligence and Mobile Robots, MIT Press, 1998.

Kopetz, H. **Real-time systems: design principles for distributed embedded applications**, Kluwer Academic Publishers, USA, 1998.

Kulitz, H.R. **Modelagem e controle fuzzy de robôs e veículos multi-articulados**, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

Kurazume, R.; Hirose, S.; Yoneda, K. **Feedforward and feedback dynamic trot gait control for a quadruped walking vehicle**, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, v.3, p. 3172-3180, Seul, Nov. 2001.

Lawrenz, W. **Can System Engineering – from theory to practical applications**, Springer-Verlag New York – Inc., USA, 1997.

Lima, L.E.M. **Modelagem e controle de um robô móvel a rodas**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, Brasil, Dez. 1995.

Lima, L.E.M.; Amaral, P.F.S. **Architecture to control a four-legged robot with the use of the CAN bus**, VI Induscon – Conferência Internacional de Aplicações Industriais, em CDROM, Joinville, Set. 2004.

Mataric, M., **Behavior-based control: main properties and implications**, Proceedings of Workshop on Intelligent Control Systems, IEEE International Conference on Robotics and Automation, p.6, France, 1992.

Microchip Technology, Inc. **PIC16F87X Data Sheet**, 1998.

Murphy, R.R. **Introduction to AI robotics**, MIT Press, USA, 2000.

Natale, M. D. **Scheduling the CAN bus with earliest deadline techniques**, Proceedings 22<sup>nd</sup> IEEE Real Time Systems Symposium (RTSS 2001), p. 73-83, Londres, Nov. 2001.

Ojeda, L., Borenstein, J. **FLEXnav: fuzzy logic expert rule-based position estimation for mobile robots on rugged terrain**, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, v.1, p. 317 – 322, Washington-DC, Mai. 2002.

Orlandi, J.G.N.; Amaral, P.F.S; **Generation of orthorectified range images for robots using monocular vision and laser stripes**, LAARS – Latin American Applied Research, 2007.

Parsa, K.; Angeles, J.; Misra, A. **Pose-and-twist estimation of a rigid body using accelerometers**, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, v.3, p. 2873 – 2878, Coréia do Sul, Nov. 2001.

Pathirana, P.N.; Black, T.J.; Nahavandi, S. **Path planning for sensor data collecting mobile robot**, Proceedings of the International Conference on Intelligent Sensors, Sensor and Information Processing Conference, p. 313-317, 2005.

Peng, S.; Lam, C.P.; Cole, G.R. **A biologically inspired four-legged walking robot**, Proceedings of IEEE International Conference of Robotics and Automation, v.2, p. 2024 – 2030, Taiwan, Set. 2003.

Sabourin, C.; Bruneau, O.; Fontaine, J.G. **Pragmatic rules for real-time control of the dynamic walking of an under-actuated biped robot**, Proceedings of the IEEE, International Conference on Robotics and Automation, v.4, p. 4216 – 4221, Los Angeles, Mai. 2004.

Siegwart, R.; Nourbakhsh, I.R. **Introduction to autonomous mobile robots**, MIT Press, 2004.

Souza, A.H.; Zeplin, S.R. **Implementação de uma rede CAN para estudos de aplicação em AGV's**, VI IDUSCON – Conferência Internacional de Aplicações Industriais, em CDRom, Joinville-SC, 2004.

Stoychev, A.; Arkin, R.C. **Combining deliberation, reactivity, and motivation in the context of a behavior-based robot architecture**, Proceedings of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Canada, v.1, p.290-295, Jan. 2001.

Szabó, S.; Oplustil, V. **Distribute CAN based control system for robotic and airborne applications**, VII ICARV - International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, 2002.

Tan, C.W.; Park, S. **Design of accelerometer-based inertial navigation systems**, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 54, n. 6, p. 2520-2530, Dez. 2005.

Tee, T.W. et al. **Mechatronics design and gait implementation of a quadruped legged robot**, VII ICARV - International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, 2002.

# ANEXO

## CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO GUARÁ

A seguir são apresentadas algumas imagens que definem detalhes da estrutura física do Guará. A relevância destas imagens é a possibilidade de inspiração de novos projetos a partir das idéias de concepção utilizadas neste projeto.

A Figura A.1 apresenta a estrutura mecânica das pernas construídas, sendo evidenciadas as quatro juntas (graus de liberdade) rotacionais utilizadas.

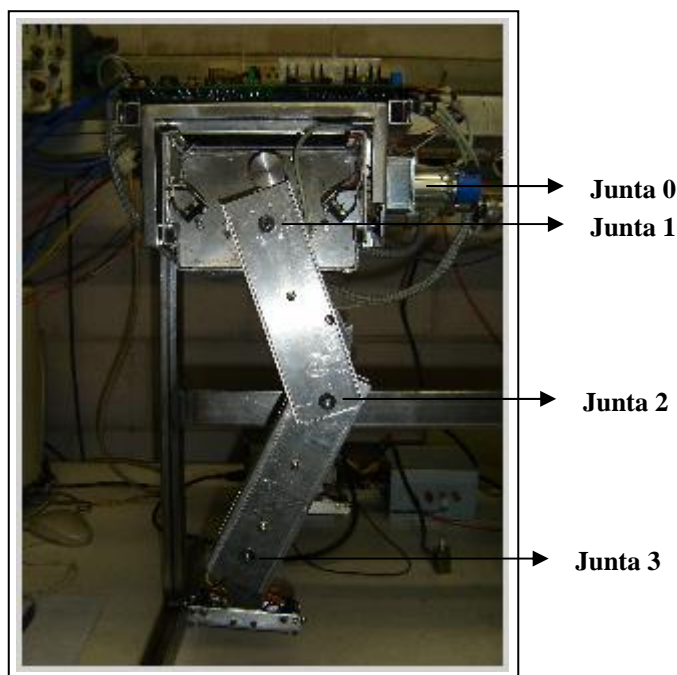
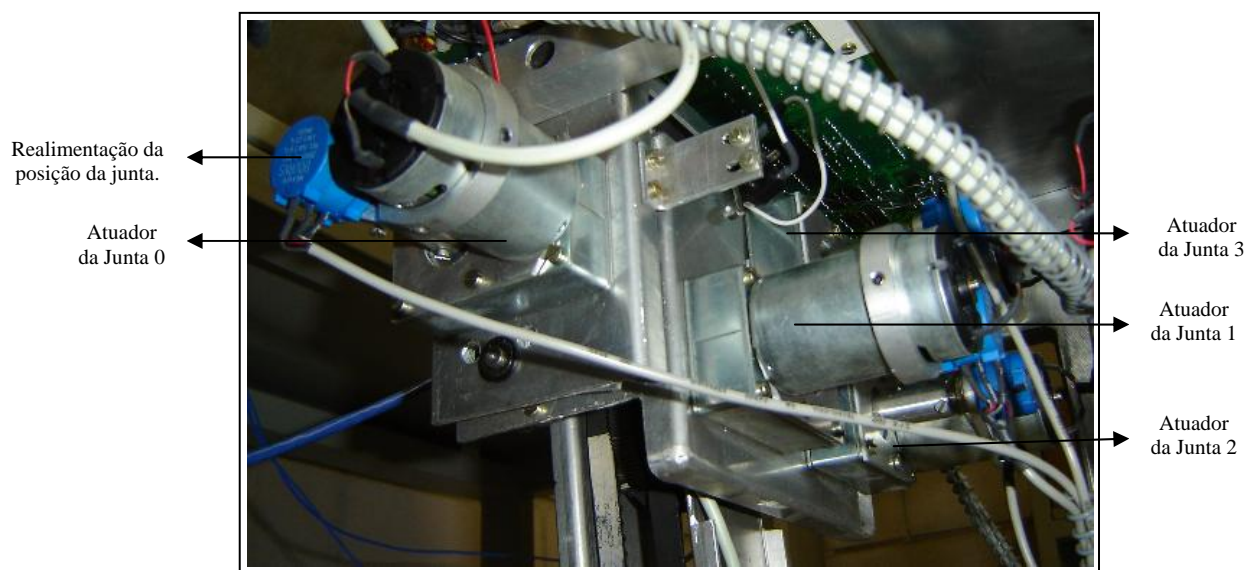


Figura A.1 - Estrutura mecânica antropomórfica de uma perna.

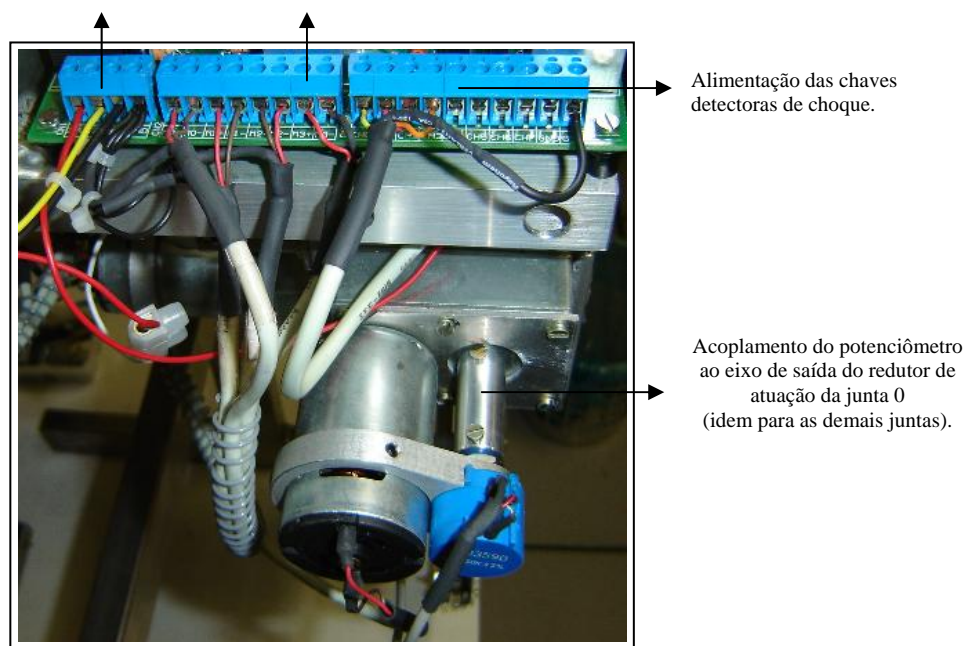
Cada grau de liberdade é definido por uma junta rotacional, tendo como elemento atuador um moto-reductor de corrente contínua de 24 V. As juntas da perna são responsáveis por movimentos à frente e a ré (cintura junta 1), movimentos em curvatura (cintura junta 0), movimentos a frente e a ré e suspensão da pata (joelho junta 2), e ainda trajetórias em declive de subida e descida (tornozelo junta 3) (Tee, 2002). Na Figura A.2 (a) e (b) pode-se observar os elementos atuadores (moto-redutores) e o elemento de realimentação de posição (potenciômetro).



(a)

Alimentação elétrica da placa de controle de uma perna: 12 Vcc, 24 Vcc e GND.

Alimentação elétrica do moto-redutores atuadores das juntas.



(b)

Figura A.2 - (a) Disposição dos moto-redutores de acionamento das juntas de uma perna; (b) acoplamento dos potenciômetros de realimentação de posição aos moto-redutores.

A placa implementada para controle de toda a perna é apresentada na Figura A.3.

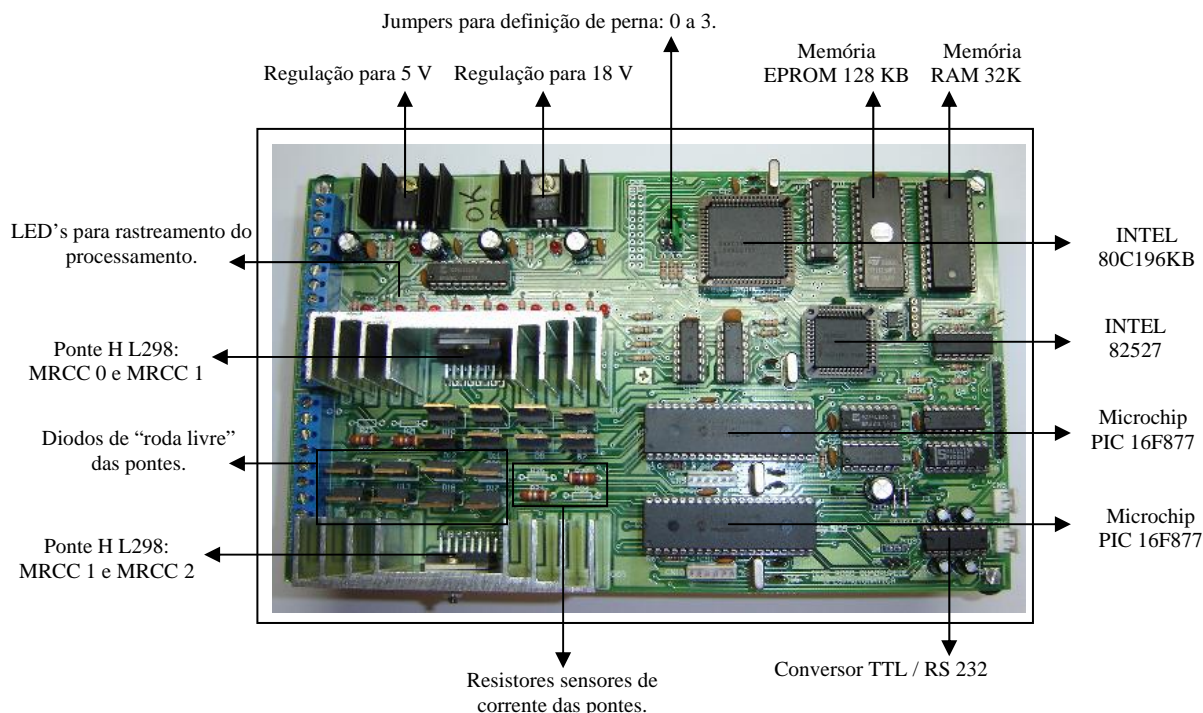


Figura A.3 - Placa de controle de uma perna do Guar.

As quatro microchaves instaladas na pata da perna com a função de detectar a colisão com obstáculos na superfície de navegação são apresentadas nas Figuras A.4 (a) e (b). Como a porta B do PIC utilizada para detecção de mudança no estado das microchaves está configurada com *pull-up* ativo, as quatro microchaves foram interligadas em um ponto comum que está conectado ao terra, e os quatro terminais restantes são então conectados as vias RB<sub>4</sub>, RB<sub>5</sub>, RB<sub>6</sub> e RB<sub>7</sub> da porta B.

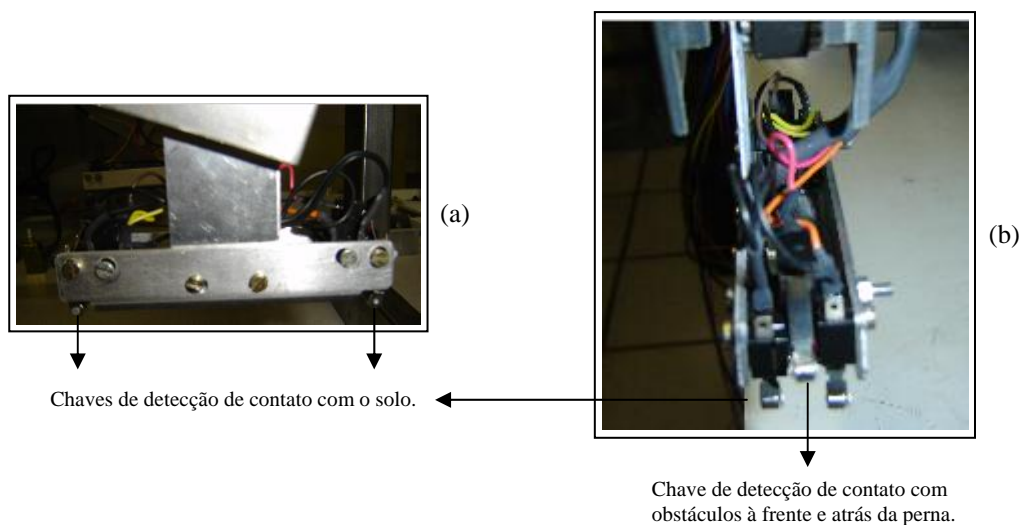


Figura A.4 - (a) Vista lateral da fixação das microchaves na pata de uma perna; (b) Vista frontal da fixação das microchaves na pata de uma perna.



Para finalizar a abordagem a respeito da estrutura física do *hardware* de controle desenvolvido para o Guará, a Figura A.17 ilustra a composição completa da arquitetura implementada para as quatro pernas, ainda sem o uso do acelerômetro.

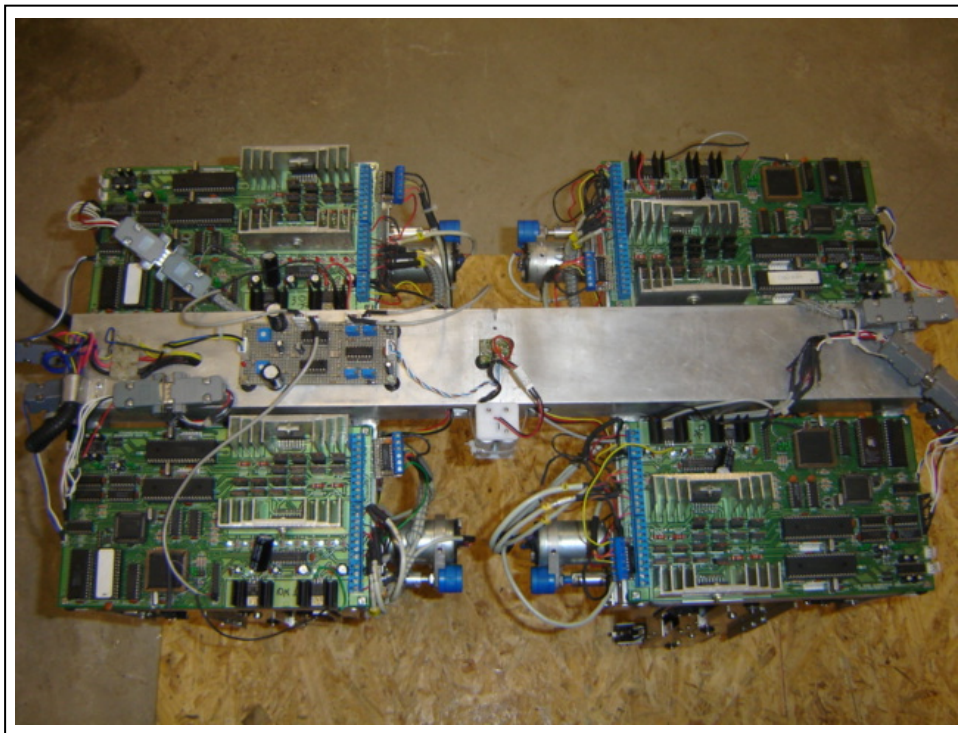


Figura A.5 – Vista completa do *hardware* de controle embarcado implementado para o Guará.

Esta ilustração apresenta a disposição e fixação das placas dos circuitos de controle na estrutura mecânica do robô. A escolha deste *layout* de fixação das placas tem como objetivo a facilidade de verificação de erros de processamento por meio do *array* de leds utilizados, a facilidade de remoção de componentes e/ou placas em caso de algum reparo físico, a distribuição de massa sobre a plataforma do robô e a proteção contra qualquer impacto com as partes móveis do robô (as pernas).